COURS DE ROUTES ET PONTS PROFESSÉ A L'ÉCOLE…



COURS DE ROUTES ET PONTS

PROFESSÉ A

L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

PAR

M. MARY

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES,
MEMBRE DU CONSEIL DE L'ÉCOLE CENTRALE, — PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES.



TEXTE

PARIS

J. DEJEY & Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS
18, rue de la Perle, 18

J. BAUDRY, LIBRAIRE-ÉDITEUR
15, rue des Saints-Pères, 15

1873

PARIS. — IMPRIMERIE DE L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES.
18, rue de la Perle.

COURS DE ROUTES ET PONTS

PROFESSÉ A

L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

PAR

M. MARY

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES,
MEMBRE DU CONSEIL DE L'ÉCOLE CENTRALE. — PROFESSEUR A L'ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES.



TEXTE

PARIS

J. DEJEY & Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS
18, rue de la Perle, 18



J. BAUDRY, LIBRAIRE-ÉDITEUR
15, rue des Saints-Pères, 15

1873

École Centrale
des
Arts et Manufactures

Année Scolaire
1861 - 1862

Cours de Routes et Ponts

Avant-propos.

La partie du sol préparée pour servir aux communications par terre entre les divers points d'un pays porte le nom de route ou de chemin.

Le mot Route s'applique particulièrement aux communications d'une certaine étendue, reliant entre elles des villes de quelque importance.

Le mot Chemin désigne les communications d'une importance moindre et d'une faible étendue.

Les principes d'après lesquels les routes et les chemins doivent être établis et entretenus font l'objet du Cours des Routes.

Nous nous occuperons d'abord de la forme et du tracé des routes, puis des calculs des déblais et des remblais auxquels donne lieu leur exécution, et des transports de terre qui en résultent ; en un mot, de ce qui constitue un projet de route. Nous terminerons par quelques détails sur la construction et l'entretien des chaussées et sur les divers travaux accessoires qui sont nécessaires pour l'entretien des routes.

Avant d'entrer en matière, nous croyons nécessaire de jeter un coup d'œil rapide sur l'origine et les progrès de cette partie de l'art de l'Ingénieur, mais pour être compris, nous avons besoin de définir les diverses parties dont se compose une route.

La partie essentielle est celle qui est destinée au passage

des voitures, on lui donne le nom de chaussée. Elle est consolidée pour pouvoir résister à l'action destructive des roues des voitures et des pieds des chevaux.

Les parties en terrain naturel qui se trouvent ordinairement à droite ou à gauche de la chaussée portent le nom d'accotements parce qu'elles servent à accoler, à soutenir la chaussée.

Au delà des accotements sont les fossés qui servent à l'écoulement des eaux, ou les talus par lesquels la route se raccorde avec le sol naturel, suivant qu'elle est plus basse ou plus haute que le terrain.

Quelquefois, pour faciliter la circulation des piétons, on établit des trottoirs ou banquettes, au delà de l'un ou des deux accotements, ou même à la place des accotements.

Ces banquettes sont percées de distance en distance par des gargouilles destinées à donner écoulement aux eaux pluviales pour les empêcher de séjourner sur la chaussée ou sur les accotements.

Les Perses et les Babyloniens s'occupent les premiers des routes.

Parmi les peuples de l'antiquité, les premiers qui se soient occupés de Routes, paraissent être les Perses et les Babyloniens, mais on n'a aucun détail sur le mode de construction qu'ils avaient suivi.

Les Carthaginois les pavent.

Les Carthaginois sont les premiers qui aient pavé les chaussées.

En Grèce, point de routes anciennes. Par quel motif?

On ne trouve dans la Morée aucune trace des chemins construits à l'époque de la puissance des anciennes Républiques Grecques. La position péninsulaire du Péloponèse, la division du territoire en une foule de petits États souvent en guerre les uns et les autres, le peu de Commerce que faisaient les Lacédémoniens qui occupaient le centre de la contrée, la beauté du climat, sont autant de causes qui ont dû rendre peu nécessaire la construction de routes assez solides pour résister jusqu'à nos jours.

Routes Romaines.

Les routes les plus anciennes dont on trouve encore des vestiges sont celles qui ont été construites par les anciens Romains et qui s'étendaient jusqu'aux limites de leur vaste Empire. Quelques unes

existent encore dans plusieurs parties de la France, elles ont été explorées sur divers points, et partout, en Italie comme en France on a trouvé la même construction.

En ligne droite.

Dans le tracé de leurs routes, les Romains s'attachaient particulièrement à éviter toute espèce de sinuosité. Pour cela, les travaux les plus gigantesques ne les arrêtaient pas, ils remblayaient les vallées, ils coupaient les montagnes.

Exécution en plaine.

Dans les plaines, lorsque la direction d'un chemin était déterminée, on en fixait la largeur par deux sillons, on enlevait le terrain meuble compris entre ces deux sillons jusqu'à ce qu'on fût parvenu au terrain solide. Cette excavation était ensuite remplie avec les matériaux résistants destinés à la construction de la chaussée.

Exécution en pays de montagnes.

Quand un chemin devait réunir deux collines, on l'élevait presque à leur hauteur. Si la contrée était marécageuse, on donnait alors à la voie une grande élévation afin de la garantir des inondations. C'est ainsi que Trajan a fait continuer la voie Appienne à travers les Marais Pontins.

Percements.

En différents endroits on a percé des montagnes. C'est ce que Vespasien pratiqua dans les Apennins pour le passage de la voie Flaminienne, c'est ce que l'on avait fait sous le mont Misène pour aller de Bayes à Cumes, et pour la grotte du Pausilippe dont Varron, Sénèque et Strabon parlent comme d'un ouvrage très ancien.

Largeur des voies Romaines.

Les voies romaines avaient ordinairement 20ᵐ de largeur et comprenaient une chaussée centrale de 6ᵐ 66 et deux accotements d'égale largeur. Quelquefois elles se réduisaient à 10ᵐ sur lesquels la chaussée prenait de 4 à 5ᵐ et les accotements de 2ᵐ50 à 3ᵐ chacun.

Épaisseur et mode de construction.

Elles avaient, comme nos routes une pente transversale nécessaire pour faciliter l'écoulement des eaux pluviales.

Les chaussées romaines que l'on a explorées présentent une épaisseur d'environ 1ᵐ. Elles sont, en général composées de quatre couches distinctes que les Romains désignaient sous les noms de Statumen, Rudus, nucleus, Summum dorsum. Celle inférieure ordinai-

-rement en maçonnerie de moellons ou de pierres plates sur 0m. 28 à 0m. 30 d'épaisseur, la seconde, en pierres plus ou moins grosses également liées avec un bon mortier avait 0m. 30 à 0m. 32. La troisième formée d'un béton parfaitement pilonné et dont la gangue est tantôt en bon mortier, tantôt en argile, manque quelquefois. Enfin la dernière est exécutée ou avec des pierres de formes régulières assemblées avec beaucoup de soin, ou avec des cailloux ou des pierres cassées.

Bornes milliaires.

Pour indiquer au voyageur le chemin qu'il avait parcouru et celui qui lui restait à parcourir, on plaçait sur les routes des bornes milliaires sur lesquelles était gravée la distance de chacune d'elles à Rome.

Destination des routes romaines. Leur influence.

Le but principal des Romains en créant des routes pour ainsi dire indestructibles, était d'assurer à leurs armées des moyens faciles de communication pour le transport de leurs approvisionnements et pour le déplacement rapide de leurs Légions ; et l'on ne saurait douter que dans un temps où il n'y avait que des chemins en terrain naturel, chez les peuples que l'on appelait barbares, ils n'aient dû l'empire du monde qu'à la facilité et à la promptitude de leurs mouvements.

Motif du peu d'intérêt qu'ils apportèrent à éviter les grands travaux.

Cependant, on s'expliquerait difficilement le peu d'intérêt qu'ils apportèrent à éviter des travaux immenses par une légère étude du tracé de leurs routes si on ne savait qu'ils employaient à l'exécution de ces travaux, non seulement leurs soldats, mais encore les peuples qu'ils avaient vaincus.

Chaussées de Brunehaut

Sous les rois de la première race, on a construit dans le Nord de la France plusieurs routes qui partent de la petite ville de Bavay dans le département du Nord, et rayonnent dans différentes directions. Ces routes qui portent le nom de Chaussées de Brunehaut sont tracées en ligne droite, comme les routes romaines, mais elles n'en ont pas la solidité.

Henri IV et Louis XIV s'occupèrent des routes.

Sous Henri IV, on s'occupa des routes beaucoup plus qu'auparavant, cependant elles restèrent dans l'état le plus fâcheux

jusqu'à Louis XIV qui fit construire avec luxe les principales routes des environs de Paris.

Les ouvrages ainsi exécutés pendant les années les plus brillantes de son règne, ne purent être entretenus pendant les guerres désastreuses de la succession, et en 1715, une voiture publique destinée pour la ville de Beauvais, mettait trois jours à faire dix-huit lieues.

Routes Royales et Seigneuriales.

A cette époque, on distinguait les routes sous la désignation de Royales et Seigneuriales. Ces dernières étaient entretenues au moyen de la corvée.

Routes construites par corvées.

Vers 1725, les intendants de Champagne et d'Alsace essayèrent les premiers d'appliquer la corvée à l'entretien et à la construction des routes Royales. Ce mode d'exécution fut ensuite universellement adopté et par son moyen on créa en 50 ans, 5 à 6000 lieues de routes.

Observations sur ces routes.

On remarque en général peu d'art dans leur tracé, peu d'économie et de soin dans leur construction. Les Ingénieurs manquaient d'instruction et d'expérience, les ouvriers, dérangés de leurs habitudes, travaillant à 7 ou 8 lieues de chez eux, apportaient peu d'attention à des ouvrages dont le plus souvent ils ne pouvaient retirer aucun avantage. Ils n'étaient d'ailleurs occupés que pendant le printemps et l'automne, saisons qui permettaient d'interrompre les travaux de la campagne. Alors, on accumulait les matériaux; mais on les employait sans intelligence, et dans les intervalles des périodes de travail, il survenait des dégradations que le défaut d'entretien aggravait promptement.

Inconvénients du mode d'entretien par corvées

M. Brisson a trouvé dans des rapports faits par des Ingénieurs de la généralité de Champagne, que l'entretien par corvée de 600 lieues de routes, exigeait, non compris les frais de surveillance, un nombre de journées d'hommes et de chevaux représentant alors 2.400.000 fr. et maintenant 4.700.000. En 1808 et 1809, les mêmes routes étaient assez bien entretenues pour 1.800.000 Fr. et cependant la circulation était considérablement accrue.

En quoi elle consistait.

La corvée imposait à tous les habitants du pays, qui n'en étaient pas dispensés par un privilège de naissance ou de position, l'obligation de contribuer aux travaux des routes, soit personnellement soit par des ouvriers qu'ils payaient. Elle obligeait aussi à fournir ses chevaux et ses voitures pour le transport des matériaux.

Suppression de la Corvée.

En 1775, on commença à discuter les inconvénients de la corvée elle ne fut cependant abolie qu'en 1786 et remplacée alors par un impôt supprimé à l'époque de la Révolution.

Péage sur les routes.

Pendant la République on imagina d'établir un péage dont le revenu devait être appliqué à l'entretien des routes. Ce revenu se trouva absorbé en partie par les frais de perception, le surplus fut pris pour subvenir aux dépenses publiques et les routes restèrent sans entretien. Dès lors, cet impôt qui aurait pu s'acclimater dans notre pays comme il l'est en Belgique et en Angleterre devint intolérable, et en

Remplacé par l'impôt sur le sel.

1804, le Premier Consul le supprima en le remplaçant par l'impôt sur le sel qui devait être lui-même appliqué à l'entretien des routes. Mais il arriva pour cet impôt comme pour le produit des péages sur 40 millions, on en affecta 24 à 25 seulement aux travaux des routes et encore la principale partie de cette somme fut-elle employée à exécuter des routes militaires et des routes destinées à assurer nos communications avec les pays réunis à l'Empire Français. C'est ainsi que l'on pava la route d'Anvers à Amsterdam, que l'on construisit celle de Metz à Mayence, que l'on ouvrit les routes du Simplon, du Mont Cenis, de la Corniche, destinées alors à assurer notre puissance en Italie, et à faciliter les communications entre deux pays soumis au même gouvernement. A cette époque, on fit plus pour les pays étrangers que pour l'ancienne France ; aussi les routes très fatiguées par le passage des convois militaires et par l'effet de deux invasions étaient-elles dans le plus mauvais état en 1815 et surtout en 1816, l'une des années les plus pluvieuses dont on ait gardé le souvenir.

Rétablissement de la corvée sous le règne de Napoléon.

Sous le règne de Napoléon Ier la corvée avait été rétablie, mais on avait changé son nom en celui de prestation en nature. Ce mode

d'entretien, s'appliquait seulement aux routes départementales et avait été abandonné avant 1814.

De 1814 à 1818, l'État ruiné par les contributions de guerre et par les frais d'entretien de l'Armée d'occupation, ne put accorder que très peu de fonds pour les routes. Le budget annuel ne s'élevait pas jusqu'à la Révolution de Juillet au delà de 16 millions. Mais, depuis cette époque on y a consacré des sommes plus considérables. Il est actuellement d'environ 24 millions.

On a fait plus, la loi du 21 Mai 1836 a pourvu à l'exécution et à l'entretien d'un réseau de chemins vicinaux qu'on distingue suivant leur importance, en chemins de grande ou de moyenne communication, lorsqu'ils intéressent un nombre plus ou moins considérable de Communes, et en chemins vicinaux ordinaires, lorsqu'ils n'ont d'intérêt que pour une ou deux communes voisines.

Les ressources créées par la loi du 21 Mai 1836 consistent.

1°. En cinq centimes sur les 4 contributions directes.

2°. En deux journées d'hommes ou de bêtes de trait.

3°. En subvention des particuliers et du Commerce.

Cette loi qui a rétabli à peu près la corvée, a été pour le pays un immense bienfait. Elle a été favorablement accueillie, parceque les prestataires travaillent pour les chemins dont ils se servent chaque jour et dont ils apprécient par conséquent toute l'utilité et non pour des routes éloignées de leurs villages.

Voici quelle était en 1858 et quelle avait été antérieurement l'importance des voies de communication par terre et par eau en France.

Longueurs.						
En 1858 des		En 1855 des				En 1851 des
Chemins de fer		Canaux de Navigation	Rivières navigables	Routes.		Chemins vicinaux de Gde communication.
Concédés	En exploitation			Impériales	Départementales	
16000^{k} 000^{m}	7500^{k} 000^{m}	4.715^{k} 000^{m}	8817^{k} 650^{m}	37501^{k} 428	45626^{k} 708^{m}	558441^{k} 000^{m}

Les routes Impériales sont pavées sur 3388^{k}116; elles doivent être rectifiées sur 4562^{k} et sont à l'état de lacunes sur 559^{k}346.

En 1855, le transport des marchandises lourdes et des matériaux de construction et de houille coûte au maximum par tonne et par kilomètre sur les routes 0^{f}20; sur les chemins de fer de 0^{f}03 à 0^{f}20, sur les canaux de 0.025 à 0^{f}07.

Routes d'Angleterre entretenues par les Communes.

En Angleterre, les routes sont entretenues par les Communes que la Loi rend responsables de leur mauvais état. Ces communes sont couvertes de leurs dépenses par les produits des péages établis sur ces routes. La perception de ce péage et les travaux d'entretien sont surveillés par des Commissions composées des principaux propriétaires. Ces routes sont très belles, et quand on ne voit les choses que superficiellement, on est disposé à attribuer ce résultat au mode de construction et d'entretien et à l'intervention des propriétaires dans la surveillance des travaux. Mais si l'on considère les choses plus attentivement, on découvre bientôt que cela tient essentiellement à une cause plus puissante et près de laquelle les autres s'annulent, nous voulons parler de l'absence totale des lourds fardeaux.

Surveillance par une Commission.

A quoi attribuer le bon état des routes anglaises

Par l'effet de la position topographique de l'Angleterre, les transports de marchandises s'effectuent, soit par les nombreux canaux qui la coupent en tous sens, soit par les paquebots et les navires de toute espèce qui établissent des communications économiques et promptes entre les ports qui se trouvent sur tout son périmètre. Dès lors, les routes ne sont, pour ainsi dire, fréquentées que par les Diligences et les voitures légères; Ainsi, il n'est pas étonnant qu'on puisse les entretenir en bon état, tandis que la route de Paris à Rouen, qui, avant la construction du Chemin de fer était continuellement parcourue par des Convois de lourdes charrettes de roulage ne pouvait être amenée qu'avec peine à l'état d'entretien

Routes d'Allemagne variant d'un État à l'autre.

En Allemagne, le mode d'entretien des routes varie d'un État à l'autre. Dans les uns, elles sont bonnes, tandis que dans un autre limitrophe, elles sont mauvaises.

Routes d'Espagne.

En Espagne, on ne s'est occupé des routes qu'à l'époque du règne de Philippe V et on s'en est occupé comme en France, dans le même temps. Des Ingénieurs Français ou instruits en France, construisirent avec luxe quelques routes qui ne furent pas mêmes faites dans l'intérêt du Commerce. Depuis lors, on s'en est peu occupé; aussi arrive-t-il souvent que les provinces du Midi sont dans la disette, quand celles du Nord sont dans l'abondance.

Nous voyons par cet exposé ce qui a été fait depuis un siècle pour créer des voies de communication faciles. En ce moment en France, tous les départements s'imposent extraordinairement pour fournir les fonds nécessaires à la construction de toutes les routes dont le besoin se fait sentir; le trésor lui même a contribué à l'exécution de plusieurs routes importantes dans les départements de l'Ouest. D'un autre côté, la loi sur les chemins vicinaux a eu pour résultat de créer entre les routes principales un réseau de communications secondaires au moyen desquelles la plus pauvre commune de France pourra bientôt, en toutes saisons, communiquer sûrement et facilement avec les centres de consommation. Ainsi nous pouvons espérer que dans peu d'années la France sillonnée par de grandes artères ferrées sera traversée dans tous les sens, par des routes bien entretenues qui assureront partout le facile débouché des produits du sol, et établiront un équilibre désirable entre les prix des mêmes marchandises sur tous les points du territoire.

Chapitre Ier

Chapitre 1er

Classification des Routes.

Parties principales et formes des routes.

Deux Catégories.

Les routes sont classées suivant leur importance en routes Impériales et en routes Départementales. Cette classification ne comprend pas les chemins vicinaux et les chemins de culture. (a)

Routes Impériales

Les routes Impériales sont celles qui réunissent Paris avec les principales villes de France, ou celles-ci entre elles. Ces routes sont entretenues aux frais du Trésor et se divisent en trois classes.

La première classe renferme les communications de Paris avec les Etats voisins et les ports militaires ; la seconde classe, les routes de Paris aux principales villes de France, la troisième, toutes les communications transversales s'étendant sur plusieurs départements.

Routes départementales.

Les routes départementales réunissent les villes d'un même département ou de deux départements voisins ; elles sont par conséquent construites dans un intérêt de localité et sont par suite exécutées et entretenues avec les fonds votés par les Conseils généraux de département.

Parties constituantes des Routes.

Les parties constituantes des routes sont, comme nous l'avons

---

(a) La classification des routes a souvent varié, soit pour mettre leur entretien à la charge des départements, soit pour le leur retirer. Maintenant, on voit encore de temps à autre classer une route départementale au rang de route Impériale, cela arrive quand les relations commerciales que l'exécution de cette route a créées lui donnent une importance que l'on n'avait pas prévue. Mais comme il en résulte que la route, ainsi élevée au rang de Route Impériale, est à la charge du Trésor, ce classement ne peut être fait que sur une Loi.

vu, la chaussée ou partie solide servant au passage des voitures ; les accotements ou les bas cotés de la route servent au dépôt des matériaux, au passage des gens de pied et même à celui des voitures pendant la belle saison ; les fossés destinés soit à écouler les eaux pluviales, soit à les recueillir lorsque les localités ne permettent pas de leur donner d'écoulement. Lorsque la route est en remblai, il y a, au lieu de fossés, des talus.

Tableau indiquant les dimensions des différentes parties qui composent une route.

Ordre des Routes	Largeur				Observations
	De la chaussée	De chaque accotement	De chaque fossé	Total non compris les fossés	
Routes Impériales des trois classes	5m à 7m (1)	2m50 à 3m50	1m 50	10m à 14m (2)	(1) La largeur de 5m pour les chaussées est un peu faible. (2) Les routes ont quelquefois 20m près de Paris.
Routes Départementales	4m à 5m	2m à 2m50	1m 50	8m à 10m	Les fossés doivent être plus creux quand ils servent à l'écoulement que quand ils n'ont pas de pente et doivent former bassin pour absorber les eaux.
Chemins vicinaux de grande communication et ordinaires	3m à 5m	1m50 à 2m00	1m 00	6m à 8m	

Profils des routes. La section d'une route par un plan vertical perpendiculaire à sa direction, est ce qu'on nomme son profil en travers. C'est au moyen du profil en travers que l'on détermine la forme de la route, c'est à dire son bombement, sa pente transversale et les dimensions à donner à ses différentes parties ; la section de la route par un cylindre vertical passant par l'axe de la route donne le profil en long, qui fait connaître les pentes dans le sens longitudinal et les longueurs des diverses parties de la route.

Profils en travers. Comme nous l'avons vu dans le tableau ci-dessus, les profil en travers des routes varie quant à la largeur des parties qui

qui le composent. Il varie également sous le rapport des pentes. Les modifications dans le sens transversal sont motivées par la position de la route relativement au sol sur lequel elle est établie. Nous allons passer en revue les divers profils les plus usités dans les principaux cas qui peuvent se présenter.

Lorsqu'une route doit être établie en plaine, c'est-à-dire, à peu près au niveau du sol environnant, on adopte le profil représenté Pl. I (Fig. 1ère)

Les pentes en travers figurées sont des pentes moyennes; dans l'exécution, elles varient avec la nature du sol et avec la bonté de la route. Plus une route est résistante, soit par l'effet de la nature du sol, soit par suite d'un entretien bien fait, plus on peut réduire les pentes transversales qui n'ont d'autre but que de faciliter l'écoulement des eaux pluviales. En effet, sur un terrain résistant, les roues ne laissent que des traces insensibles, tandis que sur un sol mou, elles creusent des ornières dans lesquelles l'eau resterait, si une grande pente transversale ne donnait le moyen de la faire écouler. La moindre pente transversale est de 0m02 par mètre, la plus grande de 0m07

Si une route en remblai est disposée comme l'indique le demi profil (Fig. 2) le fossé est remplacé par un talus à $1\frac{1}{2}$ de base pour 1 de hauteur.

Sur un revers de coteau, les déblais pris d'un côté forment les remblais de l'autre, et on conserve la chaussée bombée comme dans les (Fig. 2 et 2bis réunies), si toutefois la pente du coteau n'est pas considérable et si le côté du remblai ne forme pas précipice. Dans ce dernier cas, on a incliné quelquefois la surface entière de la route vers le coteau (Fig. 5) afin que les voitures penchent du côté de la montagne. Dans ce cas, on construit toujours du côté de la vallée, un trottoir et au delà un petit mur d'appui ou un garde-fou.

Lorsqu'une route coupe une montagne ou un côteau, par une tranchée profonde, pour diminuer la dépense, on dispose la chaussée

suivant deux pentes inclinées l'une vers l'autre (Fig 3) de manière à ramener les eaux au milieu de la chaussée qui s'étend sur toute la largeur du fond de la tranchée ; dans ce cas on élargit un peu la chaussée et on supprime les accotements et les fossés. Il résulte de là une diminution considérable dans la masse des déblais.

Si la tranchée n'est ni très longue ni très-profonde, on conserve les accotements (Fig. 4), mais on les incline vers la chaussée qui reste bombée de manière à former deux ruisseaux longitudinaux pour recevoir les eaux pluviales. Dans ce cas, les fossés sont supprimés comme dans le cas précédent.

C'est cette forme de chaussée que l'on applique au pavage des rues des villes. Mais, pour diminuer la largeur des ruisseaux on ne conserve pas une pente uniforme ; on la fait varier de la manière suivante :



Dans quelques départements on a modifié le profil ordinaire des chaussées bombées ; on y a ajouté d'un coté un trottoir comme l'indiquent les (Fig 6 et 8), de l'autre des emplacements pour déposer les matériaux approvisionnés en dehors de l'accotement (Fig. 7 et 8). En même temps on a porté la largeur de la chaussée à 6m et réduit les accotements à 1m00. Ces dispositions sont favorables à l'entretien et offrent aux piétons l'avantage d'avoir un chemin que les voitures ne peuvent dégrader ; mais cette largeur est trop faible pour une circulation active, à laquelle on satisfait généralement avec une largeur de 7m00.

Profils en long.

La pente en longueur des routes varie depuis 0 jusqu'à

une limite que l'on restreint autant qu'on le peut, à $0^m.05$ par mètre. L'horizontalité favorable au tirage puisque les chevaux ont un effort égal à faire, quelleque soit la direction dans laquelle ils marchent, ne l'est pas à l'entretien des chaussées. Sur une route horizontale, l'eau reste dans un frayé, dans une ornière dès que la roue a soulevé un léger bourrelet qui s'oppose à son écoulement transversal dans le fossé et cela quelle que soit la pente en travers. Quand au contraire la route a une pente en longueur, l'eau a un plus facile écoulement; la route est plus sèche, moins boueuse et par conséquent plus facile à entretenir.

Il ne faut cependant pas que dans la vue de faciliter l'écoulement de l'eau, on crée des pentes inutiles. Tous les efforts de l'Ingénieur doivent tendre au contraire à les éviter; si on ne le peut pas d'une manière absolue, il faut du moins en approcher autant que possible, et ne jamais dépasser la pente maximum de $0^m.05$ par mètre.

En effet, il est facile de se rendre compte de la rapidité avec laquelle la force de traction s'accroît avec cette pente.

Soit (Planche 2. Fig 10) AB un plan incliné sur l'horizon AC d'un angle α; V, la roue d'une voiture remontant le plan incliné et pesant un poids P. Les chevaux qui traînent cette voiture auront, non-seulement à vaincre le frottement qu'elle éprouve sur une route horizontale et qui, pour les meilleures routes est de 0, 02 du poids P; mais encore ils devront élever, outre leur propre poids que nous appellerons M, celui de la voiture; ce qui nécessitera de leur part un effort égal et directement opposé à la composante du poids P+M dans la direction du plan incliné ou $(P+M)\sin\alpha$. Ainsi l'effort total T à faire par les chevaux sera en montant $T = KP\cos\alpha + (P+M)\sin\alpha$

et en descendant $T' = KP\cos\alpha - (P+M)\sin\alpha$, en désignant par K le coefficient du frottement de roulement.

Si on appelle h. l'inclinaison par mètre ou la tangente de l'angle formé par le plan incliné avec l'horizon $\sin\alpha = \frac{h}{\sqrt{1+h^2}}$, $\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+h^2}}$ et, comme;

h est très-petit par rapport à 1, $\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = \tan \alpha = h$ (A) devient $T = KP + (P+M) h$ (B). D'après cela, si nous faisons abstraction du poids des chevaux, nous trouvons pour les poids qu'ils traîneront sur des plans inclinés pour lesquels h sera égal à 0m.005, 0m.01 0m.02, 0m.03, 0m.04 et 0m.05 par mètre, les résultats suivants :

Pour le chemin horizontal $P = \frac{T}{K}$

Pour 0m.005 d'inclinaison $P' = \frac{T}{K+0.005}$

Pour 0m.01 .... $P'' = \frac{T}{K+0.01}$

Pour 0m.02 .... $P''' = \frac{T}{K+0.02}$

Pour 0m.03 .... $P'''' = \frac{T}{K+0.03}$

Pour 0m.04 .... $P^{v} = \frac{T}{K+0.04}$

Pour 0m.05 .... $P^{vi} = \frac{T}{K+0.05}$

Si on suppose que le rapport du tirage à la pression est de $\frac{1}{20} = 0.05$ on aura pour .... $T = 550^{K}$

Sur une route horizontale .... $P = \frac{T}{0.05} = 11000^{K}$
id .... en rampe de 0m.005 ... $P' = \frac{T}{0.055} = 10.000^{K}$
id .... id ..... 0.01 .... $P'' = \frac{T}{0.06} = 9.166^{K}$
id .... id ..... 0.02 ..... $P''' = \frac{T}{0.07} = 7.857^{K}$
id .... id ...... 0.03 .... $P'''' = \frac{T}{0.08} = 6.875^{K}$
id .... id ...... 0.04 .... $P^{v} = \frac{T}{0.09} = 6.111^{K}$
id .... id ...... 0.05 ... $P^{vi} = \frac{T}{0.010} = 5.500^{K}$

Quand les montées ne sont pas très longues, les chevaux peuvent traîner des charges un peu plus considérables, parcequ'il est possible de leur faire donner un coup de collier pendant quelques minutes, sans les énerver. Cela ne se pourrait pas sur une longue rampe.

Lorsque la voiture descend au lieu de monter, l'effet de la pesanteur tend à faire avancer cette voiture et l'on a alors $T = KP - hP$ et la circonstance la plus favorable est celle où $K = h$, puisqu'alors le cheval n'a aucun effort à faire. Dans ce cas, le coefficient du frottement est égal à la tangente de l'angle d'inclinaison de la route sur l'horizon. Au delà de ce terme, le cheval a un effort à faire en descendant, il est obligé de retenir le véhicule au lieu de le tirer, et si l'on veut lui éviter cette fatigue et prévenir le danger auquel on est exposé quand le cheval ne peut arrêter l'impulsion de la voiture on est obligé d'enrayer, c'est-à-dire de presser sur les roues avec un frein pour les empêcher de tourner. Cette opération détermine un frottement de première espèce sur la chaussée et par suite la dégradation rapide de la chaussée que l'on doit chercher à éviter en limitant le maximum de pente des routes à celle qui répond au point où la voiture roule en descendant sans éprouver ni ralentissement ni accélération de vitesse.

De là résulte que l'on a dû être conduit à réduire la déclivité des routes au fur et à mesure de l'amélioration des chaussées. Et en effet après avoir longtemps adopté la pente de $0^m.05$, on est arrivé à celle de $0^m.03$.

M. Gordon, Ingénieur Anglais, qui s'est beaucoup occupé de la construction des routes, a fait de nombreuses expériences sur une chaussée empierrée à rampes variées. Il a trouvé qu'un attelage exerçant un effort constant traînait sur l'horizontale 11.000^k

sur une rampe de 0,01	9.900.
id .... de 0,02	8.355.
id .... de 0,05	5.859.

Si nous voulons comparer ces résultats avec ceux que donne la formule (B.), nous chercherons d'abord quel était

le coefficient K du frottement dans cette expérience; pour cela nous admettrons que dans la première et dans la dernière expérience, ce coefficient était le même, nous aurons donc à la fois
$T = 11000^K$ et $T = 5859^K + 5859^K \times 0.05$, d'où nous tirons en égalant les valeurs de T, K (11,000 - 5859) = 292,95 d'où K = 0,057 et par suite $T = 627^K$.

Connaissant le tirage nous pourrons calculer par la formule (C) les poids transportés suivant diverses inclinaisons et former le tableau comparatif suivant:

Pente par mètre	Charge traînée suivant les expériences de M. Gordon	Charge qui serait traînée par un effort constant.	Différence	Observations
0, 000	11.000	11.000	0.000	
0, 005	" "	10.112	" "	M. Gordon n'a pas fait d'expériences sur cette inclinaison.
0. 01	9.900	9.338	0,562	
0, 02	8.355	8.143	0.212	
0. 03	" "	7.207	" "	id id
0. 04	" "	6.464	" "	id id
0. 05	5.859	5.859	0.000	

On un tableau graphique qui fait mieux apprécier les légères différences que l'on remarque entre les résultats théoriques et les résultats pratiques (Planche 2. Fig. 9)

On voit par ce tableau que les résultats de l'expérience et du calcul diffèrent très peu et que les anomalies ne tiennent qu'à une très légère variation que l'on peut attribuer à l'état d'entretien de la route suivant sa déclivité et par suite dans le coefficient du frottement. Cette variation peut s'expliquer par l'avantage qu'offre, pour l'entretien, une pente légère qui assure simplement l'écoulement des eaux pluviales, tandis que la pente de 0m.05 amène quelquefois

une dégradation à la surface de la chaussée par l'effet de l'entraînement des détritus qui donnent lieu aux chaussées empierrées.

Les résultats théoriques et pratiques que nous venons de donner supposent que l'effort de traction ne varie pas quelle que soit l'inclinaison de la route ; mais en réalité, les chevaux peuvent développer, comme nous l'avons déjà fait observer, plus de force dans un moment que dans un autre, et si cet excès d'effort ne dure pas longtemps, les chevaux n'en éprouvent pas un excès de fatigue appréciable surtout, si après avoir monté une rampe de peu de longueur, ils ont une pente à descendre, et si en montant on a ralenti leur marche. On a fait de nombreuses tentatives pour se rendre compte de l'influence des rampes et des pentes, en ayant égard à cette faculté dont jouissent les moteurs animés de développer un excédant de force pendant un temps donné. Des expériences ont été faites à ce sujet, dans le but d'établir un rapport entre le chemin parcouru et l'effort de tirage, de manière à dresser un Tableau graphique au moyen duquel on aurait pu trouver le temps nécessaire pour faire parcourir un kilomètre à un cheval traînant des poids déterminés sans accroître sa fatigue.

Malheureusement des expériences de cette nature sont presque impossibles à faire, parceque l'on ne peut pas apprécier la fatigue du cheval, cependant feu M. Favier, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées a donné des tables calculées d'après une formule empirique au moyen desquelles on obtient le parcours horizontal équivalent au parcours sur des pentes ou des rampes variées.

Mais, comme l'exactitude de la formule n'a jamais été vérifiée par l'expérience, qu'elle n'a pas égard à l'enrayage qui est actuellement obligatoire et qu'elle conduit à des allongements de parcours évidemment exagérés dont la conséquence est pour le trésor la charge de l'entretien de cet allongement de route, et pour le public une perte de temps, on en fait peu

usage maintenant.

Chapitre 2.

Détails sur la formation d'un projet de route.

Exposé.

Avant de construire une route, il faut en faire le projet détaillé. Ce projet détermine :

1°. La direction et le tracé, c'est-à-dire la projection horizontale de l'axe de la route.

2°. Le profil en longueur, ou les pentes et la position de l'axe de la route par rapport à l'horizontale.

3°. Le profil en travers ou la forme de la route.

4°. Le mode d'exécution des terrassements et la construction de la chaussée.

5°. Enfin, la dépense à faire pour l'exécution de la route.

Nous allons successivement développer les principes par lesquels on doit être guidé dans la détermination de ces différentes parties d'un projet de route.

§ 1. Direction.

Au premier aperçu, la direction d'une route paraît être la même chose que le tracé : les Ingénieurs y attachent un sens différent.

La direction est déterminée par les points principaux que la route doit relier entre eux sans égard à la position des points

intermédiaires.

Le tracé au contraire a pour but de préciser, soit sur un plan, soit sur le sol, la position de tous les points de l'axe de la route, pour qu'elle passe par les lieux qui ont été indiqués lorsqu'on a fixé sa direction.

Ordinairement la direction est le résultat de considérations locales, commerciales ou militaires : dans ce cas elle est du ressort de l'Administration. Quelquefois cependant, quand les villes que l'on se propose de réunir sont séparées par des montagnes et des vallées successives ou par une chaîne difficile à franchir, les considérations administratives perdent leur poids, et il faut que l'art seul intervienne pour réduire les dépenses et pour rendre les communications aussi faciles que les localités le permettent. Cela est surtout nécessaire quand la route doit passer d'un bassin dans un autre.

Le premier soin de l'Ingénieur dans ce cas, doit être de reconnaître le point le plus bas de la chaîne de montagnes que l'on a à traverser, afin de ne pas monter inutilement pour redescendre ensuite. Cela est important, non seulement pour rendre la route plus commode, mais encore pour diminuer la dépense, parce que plus on s'élève, plus la route doit avoir de développement en conservant la même pente.

Quand on veut essayer de déterminer le point minimum par l'inspection des lieux, et quand pour cela on monte même sur le pic le plus élevé de la chaîne à franchir, la vue s'égare au milieu de tous les sommets que l'on découvre et dont on ne peut pas comparer les hauteurs et après des tentatives infructueuses, on est obligé de renoncer à une recherche qui ne conduirait même pas à une approximation.

Si l'on se détermine à niveler, il faut parcourir toutes les ondulations d'une chaîne de montagnes, et on court risque d'étendre son nivellement à 100 lieues carrées, comme cela est arrivé à des Ingénieurs Américains quand ils ont fait le projet du Canal

de jonction de la Chesapeake à l'Ohio. On perd donc un temps considérable et on emploie beaucoup d'argent pour arriver peut être à une solution qui n'est pas la meilleure.

On était cependant réduit à ces tâtonnements quand Mr Brisson, célèbre Ingénieur, a entrepris les recherches qui l'ont conduit à établir des principes certains pour arriver avec une très grande facilité à déterminer les points d'une chaîne où il faut le moins s'élever pour la franchir.

Ces principes se fondent sur des considérations de géographie physique qu'il est nécessaire de connaître et que nous allons présenter très succinctement.

Quand on considère une portion assez étendue d'un continent, on y reconnait des chaînes de montagnes et des cours d'eau. Si on examine attentivement une de ces chaînes et que l'on en suive la partie la plus élevée, on s'aperçoit qu'il est possible de tracer sur cette crête une ligne telle que les eaux que l'on y répand coulent en partie sur l'un des versants, en partie sur l'autre. Lorsque ces eaux coulent dans deux fleuves différents, la ligne ainsi déterminée, et contournant le cours entier du fleuve en partant des côtes de la mer, de part et d'autre de son embouchure, porte le nom de faîte; et l'espace qu'elle enveloppe est le bassin du fleuve qui en reçoit toutes les eaux. Le fleuve lui même est nécessairement la ligne la plus basse du bassin et porte le nom de Thalweg, mot qui signifie le chemin de la vallée. L'intervalle incliné compris entre le fleuve et le faîte est le versant droit ou le versant gauche du bassin, suivant sa position par rapport à la personne qui descend le cours du fleuve et qui va ainsi de l'amont à l'aval.

On conçoit d'après cela qu'une des divisions les plus naturelles d'un pays est celle qui le partage en bassins désignés chacun par le nom du fleuve qui en reçoit les eaux. C'est ce qui a lieu pour les affaires qui ont rapport à la navigation. Ainsi on considère les bassins de l'Escaut, de la Meuse, du Rhin, de la

Seine, de la Loire, de la Garonne, du Rhône &c. Mais comme la ligne de partage des eaux n'a rien qui la fasse reconnaître, qu'un nivellement est nécessaire pour la tracer, cette division par bassins n'a jamais eu d'application politique ni administrative.

On voit d'après ce qui vient d'être dit que les bassins sont séparés par des chaînes. Celles-ci sont plus ou moins élevées, et sont distinguées par les Géologues en chaînes principales, secondaires, tertiaires &c. Leurs formes n'ont en général rien de géométrique ni dans leur hauteur et leur pente, ni dans leur direction. Mais considérée dans son ensemble, une chaîne présente toujours une crête à peu près droite et on voit qu'il s'y rattache d'autres chaînes secondaires qui s'étendent dans une direction à peu près normale à celle de la chaîne principale. De même, à la chaîne secondaire se rattachent des chaînes tertiaires.

Les versants de la chaîne secondaire ont leurs pentes latérales par rapport à celles de la chaîne principale, tandis que les versants de la chaîne tertiaire ont leurs pentes directes et inverses c'est-à-dire l'une dans le même sens que le versant de la chaîne principale sur laquelle elle est située, l'autre en sens opposé.

Sans qu'il soit besoin de discuter le mérite des divers systèmes d'après lesquels on explique la formation des chaînes de montagnes, que ce soit par soulèvement ou autrement que se sont formées les inégalités de la surface du globe, il n'en est pas moins certain qu'il existe une relation entre les faîtes et les Thalwegs et que leurs pentes sont toujours dirigées dans le même sens. C'est de cette observation que M. Brisson est parti pour arriver à la détermination du point le plus bas d'une chaîne, ou plutôt le point le plus bas de son faîte.

Voici comment il a établi sa théorie :

Puisque les faîtes suivent sensiblement la pente des Thalwegs, le faîte principal , outre sa pente générale dans le sens du fleuve dont il limite le bassin, participera à la pente du Thalweg compris entre ce faîte et celui de la chaîne tertiaire. Et

il va en montant jusqu'à la rencontre du faîte secondaire en C. et si sur le versant opposé de la chaîne principale, un autre faîte vient aboutir au même point C, le faîte principal aura dû s'élever avec le faîte de la chaîne secondaire, le point C sera donc un point maximum sur le faîte principal.

Par la même raison, si les deux Thalwegs secondaires se correspondent, il en résultera que le faîte devra s'abaisser jusqu'au point qui correspondra à la rencontre des lignes des deux Thalwegs secondaires, et qu'il y aura là un minimum absolu.

Mais quand au contraire le faîte secondaire de l'un des bassins correspond à un Thalweg sur le versant opposé, il y a dépression d'un côté, élévation de l'autre, et par conséquent on ne peut prévoir quelle sera la forme du faîte, mais à coup sûr ce ne sera pas un minimum. Cependant un minimum relatif pourra se trouver dans l'intervalle compris entre les points où le faîte principal est rencontré par les faîtes secondaires.

Lorsque deux Thalwegs après avoir été parallèles viennent à diverger, on peut en conclure que le faîte qui les sépare s'est abaissé jusqu'au point de divergence, mais que là un relèvement du sol, a interrompu l'abaissement. Ainsi le point le plus bas entre les deux cours d'eau est nécessairement au point de divergence.

Enfin, on remarque quelquefois qu'un Thalweg a une direction opposée, mais parallèle à un autre Thalweg, les faîtes suivant l'inclinaison des cours d'eau qui en découlent, il se trouve entre les sources de ces cours d'eau un point où les deux pentes opposées du faîte viennent se rencontrer, et où se trouve par conséquent un point minimum.

On peut résumer ainsi qu'il suit les principes qui précèdent.

1.° Si un faîte est rencontré par deux ou un plus grand nombre de faîtes secondaires, le point de rencontre doit être un maximum absolu (Exemples le Plomb du Cantal, le Mont d'or &c.).

2°. Si deux Thalwegs partent d'un même faîte sur les deux versants opposés, le point de rencontre doit être un minimum relatif. (Canal St Quentin, Canal de Bourgogne.)

3°. Si un faîte est rencontré par un faîte et par un Thalweg secondaire, le point de rencontre ne présente qu'une surface à double inflexion qui n'a rien de remarquable.

4°. Si les deux Thalwegs après avoir été parallèles divergent dans des sens opposés, il y a nécessairement un minimum au point où le prolongement des deux Thalwegs vient rencontrer le faîte. (Canaux de Crozat, de la Sambre à l'Oise.)

5°. Si les deux Thalwegs ont leurs cours parallèles, mais en sens contraire sur une certaine étendue, il doit y avoir sur le faîte dans l'intervalle qui sépare leurs sources un point minimum. (Canal du Centre.)

La position des faîtes n'est indiquée avec précision nulle part puisque ce n'est qu'une ligne hypothétique que rien ne fait reconnaître sur le sol, mais les Thalwegs qui servent de lit aux ruisseaux, aux rivières et aux fleuves sont au contraire rapportés sur toutes les cartes. De sorte que, connaissant les relations qui existent entre les faîtes et les Thalwegs, on peut avec une carte bien faite et suffisamment détaillée, prévoir à priori la position des points les plus bas des chaînes de montagnes qui séparent deux bassins consécutifs. En France, la carte du Dépôt de la Guerre pour les parties déjà gravées et les feuilles de Cassini pour celles qui n'ont pas encore été publiées sont tout-à-fait propres à cette étude préparatoire. On pourra donc toujours étudier sur ces cartes, la direction qu'il conviendra de suivre pour franchir une chaîne de montagnes en son point le plus bas.

Lorsqu'il s'agit de routes ou de chemins de peu d'étendue, on peut encore tirer parti des considérations qui précèdent, si on a bien étudié le pays, et si on en connait les ruisseaux et les cours d'eau.

Quand dans l'étude d'une direction en plaine, on reconnait

la possibilité de choisir entre plusieurs tracés présentant sous le rapport de l'exécution matérielle des avantages à peu près égaux, on doit sans balancer, donner la préférence à celui qui permet de passer dans les lieux habités ou de s'en rapprocher le plus possible : on doit même, pour cela, faire quelques sacrifices, parceque le passage d'une route près des habitations est un grand avantage pour la localité qui en jouit.

§. 2.
Considérations générales sur le tracé des Routes.

Lorsque la Direction d'une route, c'est à dire les points principaux, ont été fixés soit par des considérations administratives, soit par les considérations de Géographie physique que nous avons développées, il reste à déterminer la suite non interrompue des points intermédiaires ; c'est ce qui constitue l'étude du tracé.

Pour procéder à cette étude, on doit commencer par faire une reconnaissance du terrain, afin de déterminer d'une manière approchée la position que la route doit occuper. Si le sol est assez plat pour que l'on n'ait en aucun point des déclivités plus considérables que celle que l'on a adoptée comme limite maxima, s'il ne se trouve ni maison, ni marais, ni rivière, ni aucun autre obstacle qui s'oppose à ce que l'on trace la route en ligne droite, il faut adopter le tracé rectiligne et on peut l'indiquer sur le terrain avant de s'occuper de l'étude détaillée du projet. La ligne ainsi tracée sert de base à la levée du plan, et au nivellement que nécessite cette étude.

Quand, au contraire, le sol est accidenté, quand le tracé rectiligne donnerait lieu soit à des mouvements de terre considérables pour

l'adoucissement des pentes ou rampes, soit à des traversées de marais ou de rivières, soit à des achats très-dispendieux de propriétés bâties, soit à des montées et à des descentes inutiles, il faut étudier un tracé brisé pour éviter, s'il est possible, ces inconvénients.

Dans cette étude préliminaire, si on reste en plaine, on peut avec un peu d'habileté, déterminer facilement la direction que l'on doit suivre pour éviter les obstacles qui s'opposeraient au tracé en ligne droite. On cherche le trajet le plus court, le sol le meilleur, le moins cher, le mieux exposé au soleil, le plus facile à égoutter après les pluies, la contrée où les matériaux d'entretien seront de meilleure qualité et à plus bas prix.

Dans les pays de montagnes, on doit, ou suivre le fond des vallées en se maintenant au dessus des inondations, ou passer dans le voisinage du faîte, pour éviter de franchir toutes les vallées secondaires de la chaîne que l'on suit. Le premier parti est ordinairement celui que l'on doit préférer, parceque dans le fond des vallées on peut éviter les montées et les descentes inutiles, et que l'on y trouve généralement les centres de population.

Pour descendre d'un faîte dans une vallée, on suit le versant d'une chaîne secondaire.

Quand on a des montagnes ou un passage très accidenté à franchir, le coup d'œil et l'habitude ne suffisent plus; il faut être guidé par un nivellement et par un plan. Le mode de procéder le plus sûr est de rapporter sur un plan bien fait et a une échelle de 1 à 2 millimètres des tranches horizontales levées sur le terrain au moyen du niveau et de la planchette. Quand on n'a pas le temps de lever ce plan avec tranches horizontales, on fait un nivellement en long, sur une direction que l'on suppose peu éloignée de l'axe de la route et on y rattache des profils en travers aussi étendus qu'on le juge nécessaire.

Si enfin le terrain est coupé de murs et de haies qui gênent les opérations, on se borne à faire un nivellement le long des chemins

dont le pays est coupé et on rapporte les cotes de ces nivellements sur le plan, de manière à avoir des points de hauteur aussi rapprochés que possible. Il est entendu que ces opérations ne se font que dans la zône présumée où le tracé doit se trouver. Quant à cette zône elle même, son étendue est nécessairement variable suivant les accidents plus ou moins nombreux, plus ou moins prononcés du terrain. On ne peut rien préciser à cet égard; seulement on ne doit jamais perdre de vue que, toutes choses étant égales d'ailleurs le meilleur tracé est celui qui suivrait la ligne de droite, et qu'ainsi, quand un obstacle a forcé de s'écarter de l'alignement qui joint les points obligés du tracé, il faut chercher, lorsque l'obstacle est franchi, à gagner celui de ces points vers lequel on tend, par le chemin le plus court.

Avec les documents que l'on a ainsi recueillis, on a tous les éléments nécessaires pour arriver à déterminer à peu près la position que devra occuper la route. On ne peut pas poser des principes absolus pour l'exécution de ce travail, mais néanmoins il n'est peut être pas inutile de donner les solutions géométriques et analytiques relatives aux cas où le sol présenterait des surfaces planes ou courbes auxquelles la géométrie et l'analyse peuvent s'appliquer.

Soit par exemple à projeter une route entre les points A et B. (Pl. II. Fig 1.) placés, l'un sur un plateau élevé, l'autre dans une plaine, et séparés comme l'indique le profil, par un terrain disposé suivant la pente brisée ACEFDB. Le moyen le plus simple de réunir ces deux points serait évidemment de suivre la surface du sol jusqu'en C, puis d'établir une pente unique, égale à la pente limite de C en D, pour suivre de nouveau le terrain naturel de D en B. La condition à remplir dans ce cas, consisterait à choisir autant que possible la ligne CD de manière que le déblai CGE à faire dans la partie supérieure fut égal au remblai GFD à faire dans le bas. On voit au premier coup d'œil que si cette

solution a l'avantage d'être la plus simple et de donner le chemin le plus court que l'on puisse tracer de A en B, elle a l'inconvénient de donner lieu à des déblais très considérables quand la pente EF est à la fois longue et rapide. Souvent cet inconvénient devient tel qu'il est nécessaire d'abandonner la direction rectiligne pour en chercher une autre plus économique quoique plus longue, quelquefois la distance rectiligne entre les deux points à réunir est trop courte pour permettre d'arriver d'un point à l'autre par une seule pente inférieure ou égale à la pente limite. Alors le développement n'est plus facul-tatif, il est obligé.

La recherche de ce tracé développé, le plus économique par-mi tous ceux que l'on peut imaginer, exige que l'on sache déter-miner l'axe de la route, qui en restant à fleur du sol joindrait les points A et B. (Voir le plan. Fig 2) par le tracé le plus court possible. Dans cette recherche, il peut se présenter plusieurs cas que nous allons passer en revue. Soient LF et PC les projections des lignes horizontales parallèles auxquelles se termine la partie du sol qui a une pente plus grande que la pente limite; supposons que FL et PN sont deux lignes tirées sur ce plan incliné, de manière qu'elles aient la pente limite, il pourra arriver:

1°. Que si l'on joint les points A et B, la ligne AB soit parallèle à la ligne PN, ou soit plus oblique que la ligne PN, dans ce cas, cette ligne AB sera le tracé cherché.

2°. Que la partie CD de la droite AB, soit moindre que PN, alors il faudra adopter un tracé brisé tel, que si l'on rapproche les deux arêtes LF et PC, de manière à faire coïncider les points des tracés supérieurs et inférieurs qui aboutissent aux arêtes du plan incliné, ces tracés se trouvent sur une même ligne droite.. Ce second cas se subdivise en trois autres. Si en abaissant sur les lignes LF et PC les perpendiculaires BE et AF (2e et 3e cas), les pieds de ces perpendiculaires E et F sont placés de ma-nière que EF soit parallèle à PN, le tracé AFEB sera le tracé.

cherché. Si au contraire EF est plus petit que PN, on mènera EH parallèle à PL, puis HF parallèle à PN et on aura le tracé en zig zag AFHEB. — Si enfin la ligne EF (4e cas) est plus grande que PN on mène BK parallèle et égal à PN, on joint A et K par la ligne AK, par le point R on mène RQ parallèle à PN et on a BQ parallèle à AR de sorte que ARBQ est le tracé cherché.

Lorsque le coteau au lieu d'être limité par des droites parallèles l'est par des courbes, on doit disposer le tracé d'une manière analogue à celle que nous venons de décrire. (Voir fig 3)

Quand le coteau n'a pas une seule pente, mais plusieurs pentes, la détermination du tracé minimum n'est plus aussi facile, cependant on y arrive par des considérations fort simples. Soient A et B (Fig. 4) les points entre lesquels la route doit être tracée, CD, EF, GH, IK, les courbes horizontales qui limitent les différentes pentes du coteau, soit Afjos B, le tracé cherché c'est à dire celui qui permet d'aller du point A au point B, sans dépasser la pente limitée maxima et en offrant le moindre développement possible. On sait que lorsqu'une fonction quelconque a atteint son maximum ou son minimum, les valeurs les plus voisines sont égales entre elles et à la valeur maxima ou minima. Si donc nous imaginons un tracé A ch m q B infiniment voisin du premier, ces tracés devront être égaux, et les parties comprises entre les courbes devront être égales, comme rachetant une même différence de niveau; il faudra donc, pour que les tracés soient égaux en développement que la différence Af − Ac soit égale à la différence Bq-Bs. Mais, si nous menons par tous les points de rencontre de chacun des tracés avec les courbes, des perpendiculaires, sur l'autre tracé, ces perpendiculaires formeront des triangles dans lesquels nous aurons qr = cf. ed = gj, hi = lo, mn = ps. En effet l'angle cAe étant très petit, les distances Ac et Ae ne diffèrent

que d'une quantité négligeable auprès de cf donc $qr = cf$. Les droites fj et ch faisant un très petit angle, les portions fg et dh diffèrent d'une quantité négligeable auprès des infiniment petits ed et gj; or $fj = ch$, donc $ed = gj$. Nommons $\alpha, \alpha', \alpha'', \alpha''', \beta, \beta', \beta'', \beta'''$ les angles du tracé minimum avec les courbes horizontales IK, GH, &c. les angles $\alpha, \alpha', \alpha'', \alpha'''$ diffèrent infiniment peu de ceux que forme du même coté des courbes le tracé voisin $A\,c\,h\,m\,q\,B$.

Cela posé, les équations

$$\left.\begin{array}{l} qr = cf \\ ed = gj \\ hi = lo \\ mn = ps \end{array}\right\} \begin{array}{c}\text{se remplaçant}\\ \text{respectivement par}\end{array} \left\{\begin{array}{l} sq \cos\alpha = fe \cos\beta''' \\ fe \cos\alpha''' = jh \cos\beta'' \\ jh \cos\alpha'' = om \cos\beta' \\ om \cos\alpha' = sq \cos\beta \end{array}\right.$$

Multipliant ces dernières équations membre à membre, nous aurons :

$$sq \cos\alpha \times om \cos\alpha' \times jh \cos\alpha'' \times fe \cos\alpha''' = fe \cos\beta''' \times sq \cos\beta \times om \cos\beta' \times jh \cos\beta''$$

et en supprimant les facteurs communs :

$$\cos\alpha \times \cos\alpha' \times \cos\alpha'' \times \cos\alpha''' = \cos\beta \times \cos\beta' \times \cos\beta'' \times \cos\beta'''$$

Ainsi, pour que le tracé soit un minimum, il faut que le produit des cosinus de tous les angles faits dans un même sens par les divers alignements du tracé avec les courbes, soit égal au produit des cosinus faits par les mêmes lignes dans l'autre sens.

Si on suppose le coteau formé de plans limités par des droites parallèles, on a $\beta = \alpha'$, $\beta' = \alpha''$, $\beta = \alpha''$ et il vient $\cos\alpha = \cos\beta'''$ c'est-à-dire comme nous l'avons vu que les alignements partant de A et de B, doivent faire des angles égaux avec les deux parallèles qui limitent les plans inclinés.

Quand on a à joindre, par une route, deux points A et B (Fig. 5) séparés par deux vallées dans chacune desquelles coule un cours d'eau, on doit disposer le tracé de manière que les levées, construites dans les vallées, supposées limitées aux lignes ponctuées rF et sE, tD et uC, soient normales à la direction

du cours d'eau, et que, supprimant ces levées et rapprochant les parties du tracé parallèlement à leur position primitive, ces parties ne forment qu'une seule et même ligne droite.

C'est à quoi l'on arrivera si, par le point B on mène la ligne Bm, normale à la direction du cours d'eau mn est égale à la largeur de la vallée tu; puis mo égale et parallèle à rs normale au cours d'eau pq. et si joignant oA, on mène FE égale et parallèle à rs, DE parallèle à Ao, Dc égale et parallèle à BM et à tu, puis enfin BC.

Si on a à projeter une route entre deux points A et B séparés par deux coteaux entre lesquels se trouve une plaine, on trace une ligne Po entre les deux coteaux et on prend sur cette ligne un point quelconque C. On cherche entre ce point C et les points A et B les tracés les plus courts. Si les deux alignements aboutissant au point C sont en ligne droite, le tracé sera le tracé cherché; dans le cas contraire, on essayera un nouveau tracé en prenant sur la ligne Po un point pris dans l'angle formé par les deux alignements dont nous venons de parler. Par un très court tâtonnement on trouvera le tracé cherché.

Dans l'application ces principes ne peuvent pas être suivis à la lettre parcequ'il n'arrive jamais que le sol présente des surfaces géométriques; mais comme nous l'avons dit ils peuvent servir de guides.

Lorsqu'on étudie le projet d'une route qui doit franchir une montagne élevée, il convient, pour faciliter les opérations sur le terrain d'employer à la reconnaissance de la ligne à suivre, un niveau de pente. A l'aide de cet instrument, dans lequel les fils des pinnules ou l'axe optique de la lunette, sont placés suivant la pente adoptée, on chemine sur le flanc de la montagne en suivant cette pente; et on peut ainsi indiquer la série des points qui se trouvent sur la pente limite fixée. Il se peut qu'en opérant ainsi on

arrive au sommet du coteau en un point qui ne satisfasse pas aux conditions énoncées précédemment, alors on est obligé de faire un nouveau tâtonnement qui suffit souvent pour conduire au résultat cherché, parceque le premier essai a donné la possibilité de rectifier la première erreur commise.

---

§.3.

Opération du tracé sur le terrain

Tracé des alignements rectilignes.

Quand on a à tracer sur le terrain un alignement rectiligne, il peut arriver que les deux points à joindre par une ligne droite soient disposés de manière que de l'un des points on aperçoive l'autre et les points intermédiaires, ou que d'un point intermédiaire on aperçoive les deux points donnés, ou enfin que des obstacles les cachent à la vue. Dans le premier cas, on peut, en plaçant des jalons sur les points donnés et en se plaçant près de l'un des deux, faire poser dans l'intervalle autant de jalons que l'on voudra.

Dans le second cas, après avoir comme dans le premier, placé des jalons sur les points donnés on essaie de part et d'autre d'un point intermédiaire des alignements que l'on modifie jusqu'à ce que l'on arrive à en faire passer un par les deux points donnés. On se sert pour cela de jalons, d'une alidade à pinnules ou à lunettes. Dans le troisième cas on est obligé de rattacher un point à l'autre en levant un plan sur lequel ils soient rapportés, ou au moyen d'un alignement quelconque. Ainsi soient A et B les deux points donnés (Pl. III fig. 1) séparés par un bois que l'on suppose limité au moins d'un coté. Du point A, on mènerait

une ligne AC à laquelle se rattacherait un alignement CD que l'on prolongerait jusqu'en un point D tel que la ligne BD fut parallèle à AC. On calculerait ainsi l'obliquité de la ligne CD par rapport à la ligne AB et on pourrait par suite déterminer les longueurs des lignes EH, FI, GJ de manière que les points H, I et J se trouvassent sur l'alignement cherché.

L'opération précédente donnerait le moyen de rapporter un plan sur lequel pourrait être tracée la ligne AB, de sorte que l'on obtiendrait l'angle CAB et que l'on pourrait partir du point A et tracer avec un instrument à mesurer les angles, une ligne qui aurait la direction AB.

Raccordements courbes entre les alignements droits.

Lorsque deux alignements droits viennent se couper sous un angle, on ne peut prolonger la route jusqu'au point d'intersection, parceque les voitures auraient souvent de la difficulté à se détourner, et que dans tous les cas, l'effet serait désagréable. On passe toujours d'un alignement à un autre par une courbe. On choisit pour ces courbes le cercle ou la parabole. Le rayon du cercle ou le rayon de courbure de la parabole doivent être tels que les voitures puissent parcourir la courbe sans que la voiture et son attelage soient forcés de sortir de la chaussée. En admettant qu'une voiture de roulage ait une longueur $2L$, y compris son attelage, que sa largeur soit l de dehors en dehors des bandes des roues, on voit (Pl. II Fig. 7) qu'il faut pour une chaussée d'une largeur c que le rayon AC ou $\underline{x}$ soit l'hypothénuse d'un triangle rectangle dont l'un des cotés de l'angle $AB = L$ et l'autre CB est égal à $x - (c - l)$

ce qui donne $x^2 = L^2 + \{x - (c-l)\}^2$, d'où $x = \frac{L^2 + (c-l)^2}{2(c-l)}$.

si l'on a $2L = 23^m.00$, $c = 5^m.00$, $l = 1^m.80$, la valeur de

$$x = \frac{11.50^2 + 3.20}{6.40} = 22^m.25$$

et pour rayon de l'axe de la chaussée $19^m.75$ soit $20^m.00$.

Si la route était très fréquentée, et si les voitures se suivaient par convoi, comme cela arrive quelquefois, il faudrait que trois voitures passent se croiser dans une courbe, comme l'indique la figure 8. Dans ce cas, pour déterminer le rayon x de la courbe extérieure, les voitures ayant une longueur $2DB$ ou $2EN = 2L$ et une largeur de chargement égale à l, admettons que $BG = BK = EF = l$, nous aurons $BE = c - 2l$, et $BC = x - l$, puis en comparant les triangles semblables BNE et DCB, nous aurons $BD : BC :: BE : BN$; d'où $BC = \frac{BD \times BN}{BE}$, mais $BD = L$, $BC = x - l$, $BE = c - 2l$, $BN = \sqrt{L^2 + (c-2l)^2}$, ce qui nous donne $x - l = L\frac{\sqrt{L^2+(c-2l)^2}}{c-2l}$ ou

$$x = l + \frac{L\sqrt{L^2 + (c-2l)^2}}{c-2l}$$

En supposant dans cette valeur de x, $c = 10^m$, $l = 2^m.50$, $L = 11^m.50$, il viendrait : $x = 31^m.34$.

Nous avons supposé à la voiture une plus grande largeur que dans le premier cas, parceque ici ce n'est pas seulement la largeur des roues qu'il faut considérer, mais la largeur du chargement.

Une fréquentation si considérable que celle que nous avons admise dans le second cas se présente rarement. En général on ne dispose les courbes que pour recevoir une voiture, et l'on fait varier le rayon minimum de l'axe de 20 à 25^m. On conçoit cependant que si la route devait livrer passage à des fardiers chargés de très longues pièces de bois, il faudrait augmenter le rayon et le calculer comme nous l'avons fait précédemment.

Cela posé, et admettant que l'on connaisse le rayon de

l'arc de cercle avec lequel on se proposerait de raccorder les alignements HA et HD, (Pl. III. Fig. 2), si l'on ne pouvait tracer la courbe avec un cordeau fixé au centre O, on calculerait les ordonnées eE, fF, gG aussi multipliées qu'on le voudrait. Pour avoir ces ordonnées on se servirait de l'équation du cercle $x^2 + (R-y)^2 = R^2$ dans laquelle on donnerait à x les valeurs successives BE, BF, BG &c. Par les points EFG, on élèverait des perpendiculaires égales aux ordonnées calculées et on obtiendrait ainsi autant de points du cercle que l'on voudrait.

Si l'on avait un graphomètre, observons que l'angle BKC a pour mesure la moitié de l'arc CMB égal à la circonférence diminuée de l'arc CBD, ou $\frac{1}{2}$ (quatre angles droits diminués de COB) ou deux angles droits moins $\frac{COB}{2}$; mais COB est complément de OHB, ainsi BKC = Q + OHB ; on disposerait les lunettes ou alidades de cet instrument de manière qu'elles fissent entre elles un angle ALC égal à un angle droit augmenté de la moitié de l'angle CHB, puis on se transporterait dans l'angle AOC à différents points que l'on déterminerait par la condition que le graphomètre y étant placé et une des alidades dirigée vers le point B, l'autre alidade se dirigerait sur le point C.

Quand on ne sait pas calculer les ordonnées d'un cercle et que l'on n'a pas de graphomètre, on peut tracer un cercle entre deux points donnés par la méthode de tatonnement suivante :

Soit AB le premier alignement, et CD le second ; B et C les points où le cercle cherché doit être tangent. Du point B sur la direction AB on mesure une longueur arbitraire BL ; à l'extrémité de BL on élève la perpendiculaire Ll, puis on mène Bl que l'on prolonge de lM = BL, on prend Mm double de Ll, on joint lm que l'on prolonge de mN = lM et l'on prend Nn = Mm et ainsi de suite. Si l'on arrivait ainsi au point C, la suite des points Blmno formerait l'arc de cercle cherché ; quand on n'arrive pas au point C, mais au-dessus ou au-dessous de

de la ligne qui joint B et C, on fait varier la longueur de Ll, BL restant le même, pour arriver sur la ligne BC comme dans le cas actuel en p. Alors on n'a plus qu'à calculer la longueur à donner à BE et Ec pour qu'en recommençant la construction précédente la courbe aboutisse en C. On détermine BE par la proportion suivante $Bp : BC :: BL : BE$; on prend $Ec = Ll \times \frac{BE}{BL}$, c'est-à-dire de manière que le point c soit sur Bl. On forme ainsi un polygone semblable au premier et l'on aboutit nécessairement au point C.

Le raccordement entre deux alignements ne peut se faire au moyen d'un arc de cercle qu'autant que les deux points de tangence sont à égale distance du point de rencontre de ces alignements. Cependant, il arrive souvent que cette condition ne peut être satisfaite. Dans ce cas on emploie un raccordement parabolique que l'on trace par divers procédés d'une application facile sur le terrain.

1er Tracé. — Soient AH et DH deux alignements dont le raccordement doit se faire en B et en C (Fig. 4). On mène HI de manière à diviser en deux parties égales, la ligne BC qui joint les points de tangence, on divise HI de même en deux parties égales, le point K ainsi déterminé est un des points de la courbe, puisque dans la parabole, la soustangente est double de l'abscisse. On divise BH et CH en quatre parties égales, par les points de division on mène des parallèles à HI et on joint les points milieux M et L par la ligne MKL; sur MY et LU on prend Mm et Ll égaux à ¼ de KI: sur PX, Qz, oV et NT on porte le 1/16 de KI; les points ainsi déterminés sont des points de la courbe. En effet, l'équation de cette courbe est de la forme $y^2 = px$. KI étant l'axe des x, et KM l'axe des y. Puisque la courbe passe au point B, on a pour ce point $\overline{BI}^2 = p \times KI$, d'où $p = \frac{\overline{BI}^2}{KI}$; substituant dans l'équation, il viendra $y^2 = \frac{\overline{BI}^2}{KI} x$. Si nous voulons avoir les points

située sur Qz et NT. il faudrait substituer à y sa valeur $\frac{3BI}{4}$ et il viendrait $x = \frac{3}{4}$ $KI = Eq = Fn$. Mais EQ et FN sont moitié de HK ou de KI, donc $Qq = Ll' = \frac{1}{16}$ KI. On trouverait directement que Fp et Oo sont le $\frac{1}{16}$ de KI. Si l'on voulait avoir un plus grand nombre de points on les calculerait en se servant de l'équation de la courbe comme nous venons de le faire. Cette méthode, comme celle analogue que nous avons donnée pour le cercle, exige des connaissances algébriques. En voici une autre à la portée de tous les ouvriers.

Deuxième tracé parabolique. Soient AH et DH les deux alignements donnés (Fig. 5), B et C les points de tangence. On divise les lignes BH et HC en un même nombre de parties égales, on numérote les divisions en plaçant le N° 1 en B, et ainsi en remontant jusqu'à 5; sur HC, le N° 1 est placé à la 1.ère division à partir de H et le N° 5 en C. On joint les points de division par les lignes B1; 2.2; 3,3; 4.4; 5C. Le point E où la ligne B1 coupe la ligne 2,2; le point F où la ligne 2,2; coupe la ligne 3.3; &c. sont les points d'une parabole qui sera d'autant plus près d'être tangente en B et C aux deux alignements que l'on aura divisé les côtés en un plus grand nombre de parties.

Comme l'intersection de ces lignes, obliques les unes par rapport aux autres, est difficile à déterminer par la rencontre de deux rayons visuels, on peut, quand les points de raccordement sont équidistants du sommet de l'angle, déterminer exactement les position des points d'intersection.

Soient AC et CB (Fig. 6) les deux alignements, D et E les points de raccordement; nous divisons CD et CE en un même nombre de parties égales, en 5, par exemple. Joignant par des transversales les points qui portent les mêmes numéros, nous trouverons que la courbe doit passer par les points F, G, H, I. Si nous traçons la ligne DE et que par son milieu nous menions KC, cette ligne passera au point O, intersection des lignes D 1 et E 5. En effet, si nous menons la ligne 5, 1, cette ligne sera parallèle à

DE puisqu'elle divise les côtés CD et CE en parties proportionnelles; ainsi les triangles 5.1.0 &c. DOE sont semblables; donc la ligne KO prolongée jusques à la ligne 5.1, la divise en deux parties égales, mais KC la divise de la même manière, donc KO et KC se confondent. Si maintenant par tous les points de division des deux alignements, nous menons les parallèles 2Q.3F, 4N, 5G, 1M &c. ces lignes passeront par les points d'intersection des transversales. En effet la ligne 5I dans le triangle DC1. est les $\frac{4}{5}$ de CO. ou est égale à 4 fois la ligne 2Q: de même dans le triangle EC5, la ligne 1M est les $\frac{4}{5}$ de Co et égale à 4 fois la ligne T_4. Donc $M_1 = 5I$ pris dans le triangle que nous venons de considérer. Mais M_1 dans le triangle MF_1 est égale à 4 fois RN ou à 4 fois Q_2, donc M_1 passe par l'intersection des lignes 2.2. et E_5. On démontrerait de même que les autres parallèles à CK passent par tous les points d'intersection des transversales.

Il résulte de cette propriété très remarquable, que DF est les $\frac{2}{6}$ de D_1; que F_2 est le $\frac{1}{6}$ de 2,2 &c. De sorte que l'on pourra comme dans la fig. 7 se contenter de mener la moitié des transversales et de déterminer, comme nous venons de le faire, les points qui se trouvent sur chacune d'elles. En figurant sur un croquis le système des parallèles tracées sur la figure 6, on sera assuré d'éviter toute espèce d'erreur.

Quelquefois dans l'étude d'un tracé difficile, on détermine par la condition de l'égalité des déblais aux remblais ou par toute autre, une suite de points BEFG.HKC. (Fig. 8) qui, réunis formeraient une ligne brisée. Dans ce cas si AB et CD sont les alignements qui aboutissent aux points B et C, on essaie à vue d'œil la courbe régulière qui s'écarte le moins possible des points donnés.

Dans les terrains très accidentés, soit par des obstacles naturels, soit par des constructions, on peut se trouver conduit à raccorder l'alignement AB terminé en B à l'alignement CD terminé en C.

Ce raccordement ne peut se faire que par une courbe en S On y parvient au moyen de deux arcs de cercle du même rayon, tangents entr'eux et aux deux alignements. En voici la construction :

On joint les points B et C (Fig. 9) et on prolonge cette ligne indéfiniment. En B et C, on élève deux perpendiculaires sur lesquelles on porte une même longueur arbitraire Be = Cf. De e avec un rayon ef égal à deux fois Be, on décrit un arc de cercle : par le point f on mène ff' parallèle à BC, puis on joint Bf' qui coupe Cf en F ; on mène Fe parallèle à ef' F et E sont les centres des deux arcs de cercle au moyen desquels le raccordement peut se faire. En effet, si nous menons f'C' parallèle à Cf cette ligne sera égale à Cf et à Be et nous aurons dans les deux triangles BFC et Bf'C', CF : f'C' :: BF : Bf' ; mais dans les deux triangles BFE et Bf'e on a aussi BF : Bf' :: BE : Be il s'en suit BE = CF. D'un autre coté dans ces derniers triangles BE : EF :: Be : ef', or Be est moitié de ef' par construction, donc Be sera aussi $\frac{1}{2}$ de EF

§. 4.

Application des principes précédents à l'étude détaillée d'un projet de route.

Lorsque l'on veut étudier complètement un projet de route, et pour cela en déterminer le tracé et se rendre compte du volume des déblais et des remblais dont il nécessitera l'exécution, il faut connaître exactement le relief du sol.

Cette connaissance peut être obtenue, soit en indiquant sur un plan levé très exactement et rapporté à une échelle d'au moins un ou deux millièmes, une suite de courbes de niveau déterminées par la section du sol, au moyen de plans horizontaux éloignés de 0m.50 à 1m.00 ; soit lorsque l'axe de la route a pu être déterminé sur place, en faisant sur cet axe et perpendiculairement à sa direction, un

nivellement qui représente, aussi exactement que possible la section du terrain ; 1° par un plan vertical passant par l'axe tracé sur le terrain ; 2° par des plans verticaux normaux à cet axe : Cette représentation sera considérée comme suffisamment exacte, lorsque les points consécutifs rapportés sur le profil en long et les points pris sur les profils en travers, à une même distance de l'axe seront assez rapprochés pour que les lignes droites qui les réunissent se confondent avec la surface du terrain dans l'intervalle des profils. (De sorte que la surface du sol puisse être considérée comme remplacée par une suite de surfaces gauches engendrées par une droite qui restant toujours parallèle à l'axe de la route s'appuie sur les lignes des profils en travers consécutifs.

Quand le tracé de la route n'a pas pu être étudié et arrêté sur le sol et que l'on a dû lever le plan avec les courbes de niveau dont nous venons de parler, que les courbes sont rapportées sur un plan levé à une échelle suffisante pour apprécier les mètres, on étudie le tracé définitif.

Cette étude doit avoir pour but principal, comme nous l'avons déjà dit, de déterminer le tracé de la route entre les points qui en fixent la direction, de manière que la somme des montées soit la moindre possible ; que la route soit assise sur un bon sol élevé au-dessus des inondations ; que le parcours s'écarte le moins possible de la ligne droite, que les déclivités ne dépassent pas une limite maximum de 0.m 05 pour les routes affectées spécialement au roulage, et 0.m 03 à 0.m 035 pour celles qui servent particulièrement aux voitures allant au trot ; enfin, que les volumes de déblais et de remblais se compensent et offrent un cube minimum.

Ces études sont surtout rendues faciles par le plan avec courbes horizontales, parceque, connaissant l'intervalle entre les plans horizontaux qui les séparent, on peut calculer le chemin à parcourir pour passer du niveau de l'une au niveau de l'autre avec la pente maximum que l'on a adoptée.

Si par exemple, les tranches sont prises à 1m de distance le chemin à parcourir sera de 20m, avec la pente de 0m 05, de 33m 33 avec la pente de 0m 03.

Le plan coté sert en outre à lever dans le cabinet les profils en long et en travers.

Profil en long. Le profil en long sert à apprécier les conditions relatives aux déclivités. Pour le dresser il faut rapporter sur un cylindre vertical que l'on développe, les différents points de l'axe en les déterminant par leurs distances horizontales à un point de départ, et par leurs distances verticales au-dessus, ou au-dessous d'un plan horizontal de comparaison représenté sur le dessin du profil par une ligne horizontale. Pour rendre appréciables les variations de hauteur qui sont toujours très faibles par rapport aux distances horizontales, on rapporte les hauteurs sur une échelle quintuple ou décuple de celle qui sert à mesurer les longueurs.

Nous supposerons que la fig 3, planche IV, représente une petite partie d'un profil en long, que h, h', h", h‴ est la coupe du terrain : cette coupe et les coordonnées qui répondent aux points d'inflexion sont tracées en lignes noires ; la première est pleine avec liseré noir ou hachures ; les autres sont en traits longs, ainsi que l'horizontale a b c d qui représente le plan de comparaison. Sur ce profil du terrain on indique par un trait rouge avec liseré de même couleur la ligne d'axe de la route. La position de cette ligne lorsqu'elle est définitivement arrêtée détermine les pentes de la route ; il est rare qu'elle puisse être fixée définitivement sans tâtonnement. Nous supposerons que cette ligne H, H' H" H‴ a été déterminée par les considérations précédemment développées ; et nous allons nous occuper des différentes opérations que l'étude détaillée du projet exige.

Cotes rouges. La première de ces opérations a pour objet le calcul des cotes rouges, c'est-à-dire des

hauteurs verticales comprises entre les points singuliers du terrain et la ligne du projet, telles que h H, h'H', h"H", h'"H'". Ce calcul se fait aisément lorsqu'on connait l'ordonnée du projet en un point donné et que l'on a fixé la déclivité de l'axe, car connaissant la distance de ce point de départ au point où l'on veut calculer la cote rouge, on peut facilement obtenir l'ordonnée du projet; pour cela on multiplie cette distance par la déclivité de l'axe de la route, si elle est constante dans tout l'intervalle, ou on multiplie les diverses déclivités par les longueurs horizontales qui leur correspondent. Ces déclivités totales obtenues sont ajoutées ou retranchées de l'ordonnée du point de départ suivant que la route descend ou monte à partir du point d'origine.

Quand on a ainsi obtenu l'ordonnée du sol et celle du projet qui lui correspond, on détermine la cote rouge en prenant la différence entre ces ordonnées.

Quand la ligne du projet après avoir été en dessous du sol, se relève en dessus, la ligne du projet coupe celle du terrain en un point qu'il est nécessaire de déterminer, et que l'on nomme point de passage. Ce point D (fig. 3) n'a besoin d'être connu que par sa distance à l'une des ordonnées h'H', ou h"H", c'est-à-dire par la longueur AD ou par la longueur DC; pour avoir l'une de ces longueurs en fonction des cotes rouges h'H', h"H" et de la distance Ac, nous comparons les triangles semblables Dh'H' et Dh"H" dans lesquels les cotes h'H' et h"H" sont entre elles comme les lignes horizontales AD et DC, nous aurons $\frac{h'H'}{h''H''} = \frac{AD}{DC}$ ou en composant $h'H' : h'H' + h''H'' :: AD : AD + DC :: AD : bc$

d'où $$AD = \frac{bc \times h'H'}{h'H' + h''H''}$$

Profils en travers. Après que l'on a obtenu les ordonnées des différents points du profil en long correspondant aux projets

singuliers du sol sur lesquels on a levé des profils en travers, on rapporte ces mêmes profils et on les place ou sur une feuille de papier continu ou au-dessous du profil en long et sur la même feuille, de manière que chaque profil en travers corresponde au point du profil en long auquel il se rattache. Cette disposition donne le moyen de comparer facilement ces profils. Cependant, le plus généralement, on dessine les profils en travers sur une feuille à part où ils sont équidistants. Alors les distances réelles doivent être cotées avec soin sur une ligne tracée en dehors des profils parallèlement à l'axe. Les profils sont numérotés, et les numéros sont rapportés sur les points correspondants du profil en long, afin que l'on puisse voir d'un coup d'œil la concordance des profils en travers et du profil en long. Les profils en travers se rapportent à l'échelle de 0m.005 ou de 0m.01 par mètre. On adopte la même échelle pour les hauteurs et pour les longueurs.

Quand les profils du terrain sont rapportés (fig. 1 à 2) on dessine sur chacun d'eux le profil du projet. Pour simplifier le travail, on représente sur ceux-ci la surface de la route par une ligne droite qui est placée de manière que les déblais à faire pour former l'emplacement de la chaussée étant rejetés de part et d'autre sur les accotements, ceux-ci aient la pente voulue.

La figure 1 représente deux profils consécutifs, l'un en déblai l'autre en remblai. Sur la figure 2 les deux profils sont en déblai. Il faut, sur les uns et les autres calculer les cotes rouges, comme on le fait pour le profil en long. Ainsi, supposons que l'on ait à déterminer, fig 1. l'ordonnée $h''H''$; on connait l'ordonnée CH'' qui est 11m.00, il faut chercher Ch''. Pour l'obtenir, on calcule la pente de $h'N$, laquelle est $\frac{10^m 20 - 9.50}{3.90} = 0^m.179$; on écrit cette pente sur la figure, afin de faciliter les calculs ultérieurs dans lesquels elle peut être utile. On multiplie 0m.179 par 1m.80, distance de l'ordonnée $h'H'$ à l'ordonnée $h''H''$, on trouve par là que la pente totale entre h' et h'' est de 0m.322 et qu'ainsi l'or-

l'ordonnée du point h'' est 9.50 + 0322 = 9.822, d'où on conclut définitivement la cote rouge h'' H'' = 11.00 − 9.822 = 1m. 178.

On opérerait de même dans tout autre position analogue. Nous supposerons que l'on a ainsi déterminé la cote rouge PR et que l'on veut obtenir la distance NQ répondant au point où se rencontreront la ligne du sol et le talus du déblai; on observe que PQ = NQ × 0m 179. puisque la pente par mètre de NP est de 0m 179; que QR = NQ × 1m 00 puisque la pente du talus de déblai NR est de 1m 00 par mètre. Ajoutant les deux valeurs de PQ et QR dont la somme PR est une cote rouge connue, nous aurons:

$$PR = QN \times (0.179 + 1.00) \text{ d'où } QN = \frac{PR}{0.179+1.00}$$

Si au lieu d'aller à la rencontre l'un de l'autre, comme dans l'exemple que nous venons de choisir, les deux talus se dirigeaient dans le même sens comme dans la fig 2, nous aurions $ML = Mo \times p$. et $Ms = Mo \times P$, p étant la pente par mètre de Lo et P la pente par mètre de So. Retranchant ML de Ms nous aurions $Ms - ML = Ls = Mo \times (P-p)$ et par suite $Mo = \frac{Ls}{P-p}$. La formule générale en appelant h la cote rouge, P et p les pentes, D la distance horizontale du point de rencontre des talus à la cote rouge sera donc $D = \frac{h}{P \pm p}$, dans laquelle on prendra le signe + quand les talus seront dirigés en sens contraire, et le signe − quand ils iront dans le même sens.

Lignes et points de passage: Quand un profil est en déblai, et le voisin en remblai, on a besoin pour calculer exactement les volumes de déblai et de remblai, de connaître la position des lignes qui limitent entre les profils le passage du déblai au remblai.

Si les profils sont levés de manière à représenter sensiblement les inflexions du sol dans l'hypothèse où sa surface serait engendrée par une ligne droite s'appuyant à la fois sur les deux profils en restant parallèle au plan vertical passant par l'axe du projet, l'intersection de la surface du sol avec la surface du

projet, c'est-à-dire la ligne de séparation ou de passage du déblai au remblai, serait une suite de lignes courbes produites par la section des divers plans du projet avec les surfaces gauches du terrain. Pour n'avoir pas à considérer ces lignes courbes, nous les supposerons remplacées par des droites passant par leurs extrémités ; ce qui reviendra à considérer les surfaces du terrain comme engendrées par une droite qui s'appuierait sur les profils et sur les lignes de passage.

Quant à la détermination de ces lignes, elle s'obtient pour chacun des points d'inflexion du sol ou du projet, comme nous l'avons indiqué précédemment pour l'axe du profil en long. C'est-à-dire que pour avoir la distance d'un point de passage à un des profils, on multiplie la cote rouge correspondante dans ce profil pour la distance entre les profils et que l'on divise le produit par la somme de cotes rouges correspondantes dans les deux profils. Ces calculs ne présentent aucune difficulté ; il y a seulement une observation essentielle à faire au sujet des fossés, lorsque l'un des profils est en remblai et l'autre en déblai. Dans ce cas, les lignes du projet ne sont plus parallèles puisqu'il y a, comme dans l'exemple choisi fig. 1 un fossé au profil X, et un talus de remblai au profil Y

Pour pouvoir déterminer les points de passage, on trace le fossé sur le profil Y ; on calcule les cotes rouges qui correspondent aux deux arêtes du fond et on obtient par là les points où le fossé vient se perdre dans le remblai.

Lorsqu'on a ainsi déterminé les points de passage, on porte, sur les projections AG, BI, CJ &c. des génératrices qui passent par les points d'inflexion de chaque profil des longueurs Aa, Bb, &c. proportionnelles aux distances des points de passage au profil X. On joint entre eux les points ainsi déterminés et on forme la ligne de passage qui sépare le déblai du remblai dans l'intervalle des

deux profils. Si de plus on joint lf et dK, on aura à la fois le plan des solides de déblai qui se trouveront limités d'un côté par la projection du profil X et de l'autre par la ligne brisée Fldcb a, et le plan du solide de déblai qui sera compris entre le profil Y et la ligne Kdcba. Le talus du fossé en déblai Dc'dc est dressé à 45°. le talus du remblai K'jdc, au contraire, à 1 ½ de base pour 1 de hauteur. Pour passer d'une inclinaison à l'autre on disposerait le talus Kjdc de manière que la surface fut engendrée par une droite qui s'appuierait à la fois sur les deux lignes dc et Kj et qui les diviserait en parties proportionnelles.

§.5.
Calculs des Déblais et Remblais.

Dans un projet quelconque où il s'agit de mouvement de terres dont on veut calculer le volume, la surface du sol et celle du projet sont déterminées, comme nous venons de le voir, pour les routes, par un profil en longueur pris suivant l'axe du projet, et par des profils en travers perpendiculaires au premier. Dans l'intervalle d'un profil en travers au profil suivant, la surface du terrain et celle du projet sont considérées comme engendrées par des lignes qui s'appuient à la fois sur les profils en travers restent toujours parallèles au plan vertical passant par l'axe. Dans cette génération si le profil du projet est constant, la surface engendrée sera formée d'une suite de plans, tandis que celle du terrain sera généralement une suite de surfaces gauches. Cette hypothèse sur le mode de génération de la surface du terrain exige, comme on peut le voir, que la distance entre les profils soit assez faible, ou que le sol soit assez régulier, pour que l'on puisse admettre, sans erreur sensible, que la droite

génératrice se confond dans toutes ses positions avec le terrain.

Cela posé, supposons deux profils consécutifs d'une route à construire. Il arrivera plusieurs cas; les deux profils seront à la fois en déblai ou en remblai, ou l'un étant en déblai, l'autre sera en remblai, ou enfin ils seront partie en déblai, partie en remblai.

Dans le premier cas, lorsque les profils sont tous deux en remblais ou tous deux en déblai, la masse totale des terrassements peut être décomposée par des plans verticaux parallèles à l'axe de la route, en solides qui sont limités latéralement par ces plans verticaux; aux deux bouts par les profils, et en dessus et en dessous par les surfaces du sol et du projet.

Chacun de ces solides, dans les parties de route en ligne droite, se projette horizontalement suivant un rectangle, il se termine latéralement par des trapèzes; et des deux faces supérieure et inférieure, l'une est plane, l'autre est engendrée par une droite qui s'appuie sur deux autres en restant parallèle au plan vertical passant par l'axe de la route.

Dans le second cas, quand l'un des profils est en déblai, l'autre en remblai, les deux génératrices (l'une du projet, l'autre du terrain) qui se trouvent dans un même plan vertical parallèle à l'axe, se coupent nécessairement, et la suite non interrompue de tous ces points d'intersection, forme la ligne de séparation entre le déblai et le remblai. Cette ligne est composée d'autant de portions de courbes qu'il y a de cotés différents dans les quatre directrices, mais comme la considération de ces lignes courbes rendrait impossible la cubature des solides, on suppose chacune de ces portions de courbes remplacée par la droite qui joint ses points extrêmes, et on prend ces portions de droites pour directrices des surfaces supérieure et inférieure des solides.

On voit d'après cela que ces solides seront limités latéralement par des plans verticaux parallèles à l'axe du projet, d'un bout à un des profils, de l'autre à la ligne de passage du

déblai au remblai ; en dessus et en dessous par la surface du sol et par celle du projet. La forme d'un tel solide approche donc de celle d'un prisme triangulaire ou de celle d'une pyramide triangulaire tronquée.

Dans le troisième cas, que nous avons défini plus haut, si les profils sont partie en déblai, partie en remblai, on retombe dans l'un des deux cas précédents, c'est-à-dire que, quand les parties correspondantes sont à la fois en déblai ou en remblai on a des solides à base rectangulaire, et que quand elles sont l'une en déblai, l'autre en remblai, on retombe dans le second cas mentionné au paragraphe précédent.

Pour trouver la mesure de ces différents solides, nous allons commencer par le cas le plus simple ; celui d'un solide à base rectangulaire qui serait compris entre deux profils consécutifs. Soit abcdefgi le solide proposé (Pl. IV. Fig. 4), limité en dessous par le plan ac, et en dessus par la surface gauche eg ; h, h', h'', h''', les quatre arêtes verticales qui sont des cotes rouges connues. Si on prolonge h d'une longueur h''', h' d'une longueur h, h'' de h', h''' de h'' et que l'on joigne l'extrémité de ces arêtes ainsi prolongées, on formera un nouveau solide limité au parallélogramme kl, et le solide entier al sera double du solide proposé, car la partie ajoutée est évidemment composée d'éléments équivalents à ceux du solide donné.

Mais le solide entier al est un prisme quadrangulaire tronqué que l'on peut décomposer en deux prismes triangulaires ayant chacun pour mesure le produit de leur base B par le tiers de la somme des trois hauteurs. Si l'on effectue les calculs on trouvera que le volume du solide ag a pour mesure sa base multipliée par le quart de la somme de ses hauteurs, si donc on imagine la section mn perpendiculaire aux arêtes, section qui n'est autre chose que le plan du solide, on aura (en appelant

l la largeur du solide, L la distance entre les profils, pour l'expression du solide cherché $l \times L \frac{h+h'+h''+h'''}{4}$ ...... [A]

Le solide que l'on a à cuber dans le cas de deux profils qui sont l'un en déblai, l'autre en remblai, est un cas trop particulier pour que nous cherchions directement l'expression de sa solidité, nous y arriverons en prenant le cas le plus général, celui d'un solide à faces planes et verticales dont le plan est un quadrilatère quelconque et dans lequel la surface du terrain est engendrée par une droite qui s'appuie sur les deux directions, de manière à les diviser en parties proportionnelles, comme cela arrive lorsque le solide a une base formée d'un quadrilatère quelconque.

Ainsi soit IK, (Pl. IV. Fig. 5) le quadrilatère plan qui limite inférieurement un des solides; $ABCD$ la surface gauche du terrain, laquelle est engendrée par une droite EF s'appuyant sur les lignes AB et DC qu'elle divise en parties proportionnelles, de manière que l'on a $AF:FB::DE:EC$; B la projection du solide ou sa section par un plan horizontal. Imaginons que l'on mène un plan par les deux arêtes opposées h' et h''' ce plan divisera le solide en deux autres solides que nous supposerons limités à leur partie supérieure par les triangles ACB et ACD, au lieu de l'être par les deux portions correspondantes de la surface gauche. Imaginons la même division faite par un plan passant par les deux autres arêtes, nous obtiendrons encore deux prismes triangulaires tronqués limités aux triangles ADE et DBC. Nous voyons que les deux groupes de prismes diffèrent entre eux d'un certain volume qui est la pyramide triangulaire $ABCD$. Mais si par une génératrice quelconque, EF, on mène un plan parallèle à CB, ce plan coupera le triangle DBC suivant EH parallèle à CB et on aura
(c 75) $DE:EC::DH:HB$. Nous avons par hypothèse $DE:EC::AF:FB$, ainsi nous aurons $DH:HB::AF:FB$, donc si on joint HF, cette ligne sera parallèle à AD. Le même plan coupe le triangle ABC suivant FG parallèle à BC, et par suite ADC suivant EG parallèle à AD; donc, la figure

EHFG est un parallélogramme que la diagonale EF divise en deux parties égales ; nous avons pris cette diagonale quelconque, par conséquent tout l'ensemble des génératrices qui forment la surface supérieure du volume donné divise en deux parties équivalentes, la pyramide triangulaire qui forme la différence entre les deux groupes de prismes que nous avons considérés. Ainsi le volume du solide donné est une moyenne entre les volumes des deux groupes de prismes.

D'après cela, si nous nommons t, t', t'', t''', les bases triangulaires des quatre prismes mesurées sur le plan B du solide, le premier groupe de prismes aura pour mesure :

$$t\frac{h+h'+h'''}{3} \quad \text{et} \quad t''\frac{h'+h''+h'''}{3}$$

et pour le second, on aura :

$$t'\frac{h+h'+h''}{3} \quad \text{et} \quad t'''\frac{h+h''+h'''}{3}$$

ajoutant ces quatre solides, et prenant la moitié, nous aurons pour l'expression cherchée du solide donné.

$$t\frac{h+h'+h'''}{6}+t'\frac{h+h'+h''}{6}+t''\frac{h'+h''+h'''}{6}+t'''\frac{h+h''+h'''}{6} \quad \ldots\ldots\ldots [B]$$

Si dans cette expression générale nous supposons que la base du solide est un trapèze dont les côtés t, t'' et t', t''' sont parallèles et ont pour longueur ; le premier L, le second L' (fig. 6) : si en même temps, nous appelons l la largeur du solide ou l'intervalle entre les côtés parallèles, nous aurons :

$$t=t''=\frac{l \times L}{2} \quad \text{et} \quad t'=t''=\frac{l \times L'}{2}$$

substituant ces valeurs dans l'équation B, il viendra :

$$\frac{lL}{2}\,\frac{2h+h'+h''+2h'''}{6}+\frac{lL'}{2}\,\frac{h+2h'+2h''+h'''}{6} \quad \ldots\ldots\ldots [C]$$

Si le solide se termine à une ligne de partage, comme cela

arrive quand l'un des profils est en déblai et l'autre en remblai les arêtes h'' et h''' sont nulles et on a

$$\frac{lL}{2} \quad \frac{2h+h'}{6} + \frac{lL'}{2} \quad \frac{h+2h'}{6} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots [D]$$

Comme l'emploi de cette formule donne lieu à des calculs assez longs, puisque l'on ne peut poser immédiatement sur le tableau du calcul des terrassements, les facteurs des multiplications à faire, on substitue à la formule [D] la formule suivante :

$$l \times \frac{h+h'}{2} \times \frac{L+L'}{4} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots [E]$$

Si on effectue les calculs dans les deux expressions [D] et [E] on trouvera que la différence est $\frac{l}{24}(L-L')(h-h')$. Cette différence est nulle quand $L=L'$ ou quand $h=h'$; elle est au contraire un maximum quand $L'=0$, et $h'=0$, c'est-à-dire quand le solide est une pyramide triangulaire.

Quand, dans l'expression (C) on suppose $L=L'$ c'est-à dire, lorsque le solide a pour projection un rectangle, il vient :

$$l \times L \quad \frac{h+h'+h''+h'''}{4} \ldots\ldots\ldots [A]$$

c'est la formule que nous avons trouvée directement et que l'on emploie lorsque les profils sont tous deux, soit en déblai, soit en remblai. Alors $L=L'$ et on peut mettre cette formule sous la forme

$$\frac{L}{2}\left\{\frac{(h+h')l}{2} + l\,\frac{(h''+h''')}{2}\right\}$$

Mais $l\frac{h+h'}{2}$ est la surface du solide sur l'un des profils, $l\frac{h''+h'''}{2}$ est sa surface sur l'autre profil, ainsi le solide s'obtient en multipliant la somme des surfaces des deux profils par la moitié de leur distance. Si donc tous les solides ont des bases rectangulaires le volume entier, dans l'intervalle des deux profils, sera égal à la moyenne entre les surfaces des deux profils, multipliée par leur distance

Si quelques uns des solides sont des pyramides, en multipliant

la surface moyenne par la distance, la base des pyramides se trouve multipliée par la demi-distance entre les deux profils ou par la moitié de sa hauteur, au lieu de l'être par le tiers; ainsi l'erreur, en appelant B la base de la pyramide, est $B \times \frac{L}{2} - B \times \frac{L}{3}$ ou $B \times \frac{L}{6}$ ou la moitié du volume réel, lequel est $\frac{BL}{3}$. On jugera dans quel cas on pourra négliger cette erreur qui tend à accroître le volume.

Il résulte de ce qui précède, que, quand les deux profils consécutifs sont en déblai ou en remblai en même temps, on peut, dans l'intervalle de ces profils, obtenir le volume du solide compris entre les surfaces du projet et du terrain, en calculant les surfaces de déblai ou de remblai sur chacun de ces profils et multipliant la somme de ces surfaces par la demi-distance entre les profils.

Quand il y a passage du déblai au remblai dans l'intervalle des profils, on calcule les points de passage, puis pour avoir les volumes, on se sert de la formule [D], ou de la formule [E] moins exacte. Mais l'une ou l'autre de ces formules entraîne des calculs fort longs. Pour les abréger, on suppose que les surfaces de chaque profil sont des rectangles, de sorte que les deux solides sont disposés comme dans la figure 7. Ce sont deux prismes triangulaires dont on aura la solidité en multipliant la surface r du remblai sur l'un des profils, et d du déblai sur l'autre profil, la première par la demi-distance de la ligne de passage ab au profil en remblai, la seconde par la demi-distance de cette même ligne à l'autre profil. Or, ces distances que nous nommerons L' et L'' s'obtiendront par les formules suivantes : $L' = \frac{Lr}{r+d}$ et $L'' = \frac{Ld}{r+d}$, en considérant les surfaces comme des cotes rouges.

Toutes les fois que les surfaces des profils ne s'éloignent pas beaucoup de la forme d'un rectangle, ces formules sont très approximatives; mais quand elles s'approchent de la forme triangulaire, l'erreur s'accroît. Quoiqu'il en soit, à moins qu'il ne s'agisse de volumes très considérables, on emploie ces formules pour

abréger les calculs, toutes les fois qu'il y a passage du déblai au remblai dans l'intervalle de deux profils consécutifs.

Résumant ce que nous venons de dire sur le calcul des terrasses et désignant par r et r' les surfaces de remblai, par d et d' les surfaces de déblai, par I l'intervalle entre les profils, nous allons indiquer ce qu'il y a à faire dans les différents cas qui peuvent se présenter

1er Cas. (Fig. 8. Pl. IV)

Si les deux profils consécutifs sont à la fois en remblai, le volume R est donné par la formule $R = \frac{(r+r')I}{2}$.

2e Cas.

Si l'un est en remblai, l'autre en déblai, les solides de remblai et de déblai R et D sont donnés par les formules :

$$R = \frac{r'+I'}{2}, \quad D = \frac{d'I''}{2}$$

dans lesquelles

$$I' = \frac{I \times r}{r+d} \quad \text{et} \quad I'' = \frac{Id}{r+d}.$$

3e Cas (Fig. 9)

Si les deux profils sont partie en déblai partie en remblai, mais de manière que le déblai de l'un corresponde au déblai de l'autre, on a :

$$R = \frac{(r+r')I}{2} \quad \text{et} \quad D = \frac{(d+d')I}{2}$$

comme dans le premier cas.

4e Cas (Fig. 10)

Si les deux profils sont partie en déblai, partie en remblai, mais si le déblai ne correspond pas au déblai, on calcule les volumes R et D qui se rattachent au premier profil, et les volumes D et R qui se rattachent au second par les formules :

$$R = \frac{rL'}{2},\; D' = \frac{d'L''}{2},\; D = \frac{dL'''}{2},\; R = \frac{r'L^{IV}}{2}$$

dans lesquelles $L' L'' L''' L^{IV}$ sont données par les formules

$$L' = \frac{Lr}{r+d},\; L'' = \frac{Ld}{r+d'},\; L''' = \frac{Ld'}{r+d},\; L^{IV} = \frac{Lr}{r+d'}$$

5e Cas. (Fig. 11)

Si enfin un des profils est entièrement en déblai ou entièrement en remblai, et l'autre partie en déblai, partie en remblai par le point de passage du déblai au remblai sur ce dernier, on mène un plan parallèle à l'axe du projet, et on divise l'autre profil en deux parties que l'on compare avec les portions correspondantes, l'une en déblai, l'autre en remblai du premier profil.

$$R = \frac{(r'+r'')L}{2},\; R_1' = \frac{rL'}{2},\; D = \frac{dL''}{2},\; L' = \frac{Lr''}{r''+d},\; L'' = \frac{Ld}{r''+d}$$

Applications numériques.

Nous venons de voir que l'on pouvait calculer les déblais et les remblais, soit en employant des formules qui en donnent les volumes avec toute l'exactitude désirable, soit en se servant des formules fondées sur des hypothèses qui s'éloignent plus ou moins de la réalité et qui par conséquent ne conduisent qu'à des résultats approchés.

Nous croyons nécessaire de présenter des applications numériques de ces formules, afin d'éclaircir les difficultés que l'on pourrait éprouver en les employant pour la première fois.

Nous commencerons par la formule exacte : soit (Fig 1 Pl. V) deux demi-profils d'une route sur chacun desquels le terrain est indiqué par une ligne avec hachures ; dont la position est déterminée par des cotes horizontales mesurées à partir de l'axe et des cotes verticales prises au dessous d'un même plan de 1?

comparaison. Les cotes sont écrites en chiffres renforcés; les distances horizontales sont cotées au dessus de la ligne de terre qui représente le plan de comparaison.

Les lignes du projet sont également déterminées par leurs distances à l'axe de la route et au plan de comparaison; mais ces cotes sont indiquées en chiffres plus faiblement tracés. Les cotes dans le sens horizontal sont placées au dessous de la ligne de terre.

D'après le profil, la demi-largeur de la chaussée se trouve de 6m.08, mais si l'on se reporte à la fig. 2 on verra que cette largeur se réduira à 6m quand avec les déblais de l'encaissement a b c d, on aura exhaussé l'accotement du quadrilatère a c g f.

Lorsque les profils sont ainsi dessinés les uns à la suite des autres, on calcule les cotes rouges correspondantes à toutes les inflexions du terrain ou du projet, puis les points de passage des solides de déblai et de remblai. Supposons toutes les cotes déterminées d'après les formules indiquées précédemment, on prépare le tableau du calcul comme il est indiqué sur la planche V, puis on commence par l'une des extrémités du premier profil; par la pyramide correspondante au déblai du talus extérieur du fossé. On indique ce solide par une lettre a par exemple. Ce solide est le premier calculé entre les deux profils, il porte le N.° 1 placé dans la première colonne du tableau, tandis que la lettre indicative a est placée dans la seconde. La largeur du solide, 1m.71, est écrite dans la colonne des hauteurs, la surface de la base dans la troisième; comme on ne prend pas de surfaces moyennes, la 6e colonne reste en blanc; dans la 7e on porte le tiers de la cote de passage 12m.06, lequel est 4m.02, et on obtient pour le cube de la pyramide 5m.c.64, que l'on écrit dans la 8e colonne.

Pour le solide suivant qui est le second et qu'indique la lettre b, on écrit de même son numéro d'ordre dans la première colonne, et sa lettre indicative dans la colonne 2. Son volume doit

s'évaluer par la formule $D = l \times \frac{h+h'}{2} \times \frac{L+L'}{4}$, dans laquelle l est la largeur du solide, h une des cotes rouges h' l'autre, L une des cotes de passage et L' la seconde.

La largeur, $l = 0^m50$, s'écrit colonne 3 ; la hauteur $\frac{h+h'}{2} = \frac{1.64+1.62}{2} = 1^m63$, s'écrit colonne 4 ; la surface 0.81 s'écrit colonne 5 ; la longueur $\frac{L+L'}{4} = \frac{12.06+13.00}{4} = \frac{25.06}{4} = 6.27$, s'écrit colonne 7 et le cube $5^m.11$, colonne 8.

On procède ainsi pour tous les solides analogues, mais quand on arrive à un solide qui, comme le solide i s'étend d'un profil à l'autre, il faut prendre la moyenne des deux surfaces ; cette moyenne s'obtient par une seule multiplication de 1^m60, longueur moyenne, par le quart de la somme des cotes rouges 0^m91 et 0^m50 ou $\frac{1^m41}{4} = 0^m36$.

Ainsi pour le solide 9, désigné par la lettre i je porte 1.60 à la colonne 3, 0^m36 à la colonne 4, et le produit 0.58 qui est la surface moyenne à la colonne 6. La longueur du solide est égale à la distance 15^m entre les profils. Comme il ne peut se présenter que des solides analogues à ceux que nous avons considérés, nous n'entrerons pas dans d'autres détails sur l'emploi de la méthode exacte.

Pour obtenir les volumes de déblai et de remblai par la méthode approchée, on calcule, sur chaque profil, les cotes rouges correspondantes aux points d'inflexion des lignes qui représentent le terrain et le projet, mais on ne calcule pas les cotes rouges correspondantes aux inflexions du profil suivant ou du profil précédent, comme on le fait dans la méthode exacte.

Quand on a obtenu toutes les cotes rouges, on calcule les surfaces des triangles et trapèzes dans lesquels se décomposent les surfaces de déblai D et de remblai R' qui se correspondent sur les profils pris pour exemple, et on écrit dans la seconde colonne de D en R'. On obtient la surface de déblai $D = 5^{mq}56$, la surface de remblai $R' = 0^{mq}93$, on considère les surfaces comme des cotes,

rongea et au moyen de la formule

$$\frac{D \times L}{D \times R} = d \text{ on trouve } d = \frac{5.56 \times 15}{6.49} = 12.85$$

ce qui donne pour le volume :

$$V = D \times \frac{d}{2} = 5.56 \times 6.42 = 35.70$$

la 1/2 longueur 6.42 s'écrit dans la colonne 7 vis à vis 5.56 et le cube dans la colonne 8

Pour le remblai on a $r' = 15 - 12.85 = 2.15$ dont la moitié, 1m.08, s'écrit à la suite de $R = 0^{m}.93$ et on obtient pour le volume de remblai 1m.

On opérerait de la même manière entre R et D'.

Quand il n'y a pas de points de passage entre les deux profils, on calcule les surfaces de ces profils en les décomposant en triangles et trapèzes. On ajoute les surfaces des deux profils consécutifs et on multiplie la somme par la demi distance entre les profils.

Dans le cas où la route ne suit pas une ligne droite on décompose les profils de même que dans les parties rectilignes et on fait des calculs de la même manière en mesurant seulement les distances sur les cylindres concentriques à celui sur lequel l'axe de la route est tracé, car dans ce cas les divers solides au lieu d'être compris latéralement entre des plans verticaux parallèles à l'axe de la route, sont compris entre des cylindres verticaux concentriques, à celui qui passe par l'axe de la route. Il est évident que les méthodes applicables dans un cas le sont dans l'autre.

Calcul approximatif pour le projet.

(c. 15) Quand on fait un projet on n'a besoin que d'un aperçu du volume des terrassements ; on fait en conséquence les calculs d'après les méthodes les plus expéditives pourvu qu'elles donnent plutôt un résultat trop fort qu'un résultat trop faible. Ainsi, après avoir calculé pour chaque profil les surfaces de déblai et de remblai, on

ajoute les surfaces de même nature de deux profils consécutifs et on multiplie les sommes ainsi obtenues par la demi distance de ces profils. Ce qui revient à supposer que les solides de déblai ou de remblai, qui aboutissent à des lignes de passage au lieu de s'arrêter à ces lignes, s'étendent dans tout l'intervalle des deux profils. Il en résulte évidemment une augmentation dans les volumes.

Calcul exact pour faire le compte de l'Entrepreneur.

Lorsque le projet est adjugé et va s'exécuter, on lève des profils sur le terrain en présence de l'entrepreneur, et on les multiplie autant que cela est nécessaire pour que toutes les inflexions du sol soient rendues sur ces profils. On y trace ensuite le projet tel qu'il s'exécute et c'est alors que l'on calcule avec toute la précision désirable les volumes de déblai et de remblai; cela est alors indispensable, puisque ce calcul sert à établir le compte de l'Entrepreneur.

Distinction des diverses natures de terrain

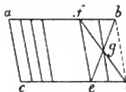
Si le sol à déblayer présente plusieurs sortes de terrains dont la fouille doive être payée à des prix différents, il est nécessaire de rapporter sur les profils les lignes de séparation des diverses natures du sol, afin de pouvoir calculer le volume des uns et des autres. On détermine ces lignes en faisant des sondes à chacun des profils.

---

§. 6
Évaluation des distances de transport

Utilité du Calcul des distances de transport

Lorsqu'au moyen des méthodes exposées précédemment on a calculé les volumes de déblai et de remblai, il faut, pour évaluer la dépense, connaître les distances qu'il faudra parcourir pour transporter les terres provenant du déblai dans l'emplacement assigné au remblai. Il n'est pas indifférent que ce transport s'effectue d'une manière ou d'une autre, il faut que la somme des chemins parcourus soit la moindre possible.



Ainsi supposons qu'on ait à transporter une masse de déblai représenté par la ligne ab pour former un remblai représenté par la ligne $cd = ab$. Il est évident que l'on devra porter a sur c, b sur d et ainsi tous les points de ab sur les points homologues de cd, de manière que les chemins parcourus soient parallèles à ac. Si on suivait toute autre direction, le trajet serait plus long, car il faudrait que les chemins se croisassent, or, on a $bd < bg + gd$ et $fe < fg + ge$ ou $bd + fe < be + fd$. On voit que la distance moyenne du transport est égale à la distance qui joint les milieux des deux droites.



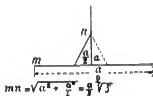
Si le déblai et le remblai ont la même forme et que rien ne gêne le roulage, on peut imaginer les deux solides coupés par des plans verticaux parallèles entre eux et à la ligne qui joint les centres de gravité. En transportant chaque tranche de l'un des solides sur la tranche égale de l'autre solide, on voit que la distance moyenne du transport sera égale à la distance des centres de gravité.

Cas où la distance moyenne des transports n'est pas égale à la distance des centres de gravité.

Il arrive cependant des cas où cette égalité n'existe pas; par exemple si tous les roulages sont astreints à passer au même point. Cela est encore plus évident, si le déblai est au centre du remblai, et réciproquement, puisque les deux centres de gravité se confondent et que la distance du transport peut être aussi grande que possible. Un autre exemple frappant est celui d'une droite perpendiculaire sur le milieu d'une autre droite égale à la première. Car si $2a$ est la longueur commune des deux lignes, la distance moyenne du transport sera $\frac{a}{2}\sqrt{5}$; tandis que la distance des centres de gravité sera $\frac{a}{2}$.

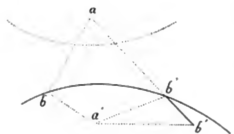
1° Passage obligé en un point.

2° Déblai concentrique au remblai.



Une question intéressante est celle de la répartition des déblais, de manière à rendre la distance de transport un minimum. Ainsi

nous avons deux volumes b et b' à transporter en a et a', il s'agit de savoir s'il vaut mieux porter b en a et b' en a' ou réciproquement. Il peut arriver plusieurs cas ; si $ab + a'b' = ab' + ba'$ il est indifférent de faire le transport d'une manière ou de l'autre ; mais si $ab + a'b' < ab' + ba'$, c'est-à-dire si $ab - ba' < ab' - a'b'$, il faut porter b en a et b' en a'. Dans le premier cas b et b' sont placés sur une branche d'hyperbole dont a et a' sont les foyers ; dans le second, le point b' est en dedans de l'hyperbole qui aurait les mêmes foyers et passerait par le point b.



En général, pour résoudre ces questions, il faut multiplier les cubes par les distances de transport et chercher le minimum.

On peut, à ce sujet, se proposer plusieurs problèmes ; mais comme dans la pratique on ne fait nul usage de ces questions spéculatives, nous les laisserons de coté et nous nous bornerons, après les avoir indiquées, à dire qu'en général, et excepté quelques cas particuliers évidents par eux-mêmes, on regarde les distances de transport comme égales aux distances des centres de gravité des volumes de déblai et de remblai.

La détermination de ces distances a une grande importance sur l'évaluation de la dépense d'un travail qui comporte le déplacement d'un volume considérable de terre. Pour les déterminer on a recours à divers procédés. Le plus exact consiste à dresser un tableau graphique disposé comme il suit :

On trace une ligne droite dans le sens de la longueur et au milieu d'une feuille de papier ; (Pl VI. fig 1) sur cette ligne, on porte, à une échelle assez grande (0^m.001 ou 0^m.002 par mètre), les distances entre les profils, que nous supposerons par exemple au nombre de 6 ; aux points ainsi déterminés, a, b, c, d, e, f on élève des perpendiculaires sur a, f. Ces perpendiculaires nous représenteront en plan les projections des profils, sur chacune

d'elles nous porterons d'un coté de la ligne a.f une longueur proportionnelle à la surface du déblai trouvée par le calcul, et de l'autre une longueur proportionnelle à la surface du remblai. Ainsi en supposant que les six profils que nous considérons sont ceux qui sont dessinés vis à vis chacune des lignes de terre a, b, c, d, e, f. et que les surfaces de déblai et de remblai sont celles indiquées sur ces profils, pour le profil a, nous porterons d'un côté de a en l 7.m 08 de remblai et de l'autre, de a en V, 25.m 42 de déblai. Pour cela nous nous servirons d'une échelle qui, par exemple, pourra être de 0.m 005 par mètre carré. Nous ferons la même opération sur les profil suivant où nous porterons 3.mq 79 du côté du remblai de b en m; et 6.mq 62 du côté du déblai de b en i.

En examinant les profils tels qu'ils sont représentés fig. 2 et 3, on voit que les déblais de l'un correspondent aux déblais de l'autre, et les remblais du premier aux remblais du second. Si nous nous rappelons que dans ce cas il faut, pour avoir les volumes, ajouter d'un coté les surfaces de déblai, de l'autre celles de remblai et multiplier les deux sommes par la moitié de la distance entre les profils, nous voyons que ces volumes, l'un de déblai, l'autre de remblai, seront représentés en surface par les deux trapèzes a b i v et a b l m

Si nous considérons de même les profils b et c, nous remarquerons qu'au déblai 6.mq 62 du profil b correspond sur le profil c, une surface de 3.mq 31, et qu'à la surface de remblai 3.mq 79 du profil b, correspond une surface, 10.mq 13, sur le profil c. Les volumes de déblai et de remblai compris entre la surface de déblai 6.mq 62 du profil b et la surface de remblai 3.mq 31 du profil c, sont donc représentés par les deux triangles b i K et c K K' opposés au sommet. De même le volume des remblais compris entre les surfaces 3.mq 79 et 10.m 13 est représenté par le trapèze b m x c. De sorte que si nous menons K g, que nous portions 3.mq 31 de x en h et que nous joignions g h, le triangle g h x sera égal au triangle K c K'

et le pentagone b m g h c représentera le déblai total à faire entre b et c.

Les profils c et d sont tous deux en remblai ; le premier c a une surface totale de 13^{mq} 44, le second de 3^{mq} 03 ; le volume de remblai sera donné par la surface du trapèze c h i d

Le profil d est totalement en remblai, tandis que le profil e est en déblai d'un coté en remblai de l'autre. La partie du profil d qui correspond au déblai du profil e est de 1^{mq} 05 ; ce déblai est de 2^{mq} 09 et se porte de e en A. Les volumes correspondants (d'après ce que nous avons déja expliqué pour les profils b et c) sont représentés, le remblai par d p u, le déblai par p A e. Le volume compris entre les parties de ces profils, qui sont à la fois en remblai, est représenté par le trapèze d s t e, dont les côtés parallèles d et s sont respectivement égaux aux surfaces 3^{mq} 03 et 4^{mq} 11 de ces profils. Le triangle S I L est construit pour être équivalent au triangle d u p, comme le triangle g h x a été fait équivalent au triangle K c K'

Entre les profils e et f qui sont à la fois en déblai et en remblai, on fait une construction analogue à celle qui a été faite entre les profils a et b. Le volume du déblai est donné par la surface du trapèze A B f e, celui du remblai par le trapèze e t f o.

Cette construction faite, si nous nous reportons entre les profils a et b, nous voyons que le remblai peut être fait en prenant les terres du déblai pour les jeter du côté du remblai. Cette opération sera représentée graphiquement en rabattant le trapèze a l b m sur le trapèze b v, dont il détachera le trapèze a b M N. De sorte que les déblais qui se trouveront en excédent entre les deux profils a et b seront représentés graphiquement par le trapèze v i M N, dont la surface est de 635$^{m.}$ 10 Nous indiquons par les hachures les volumes ainsi employés sans transport dans le sens longitudinal.

Nous opérerons de même entre les profils b et c, c'est-à-dire que nous rabattrons le triangle b i K sur le pentagone

b m g h c ; mais ici il arrive que le triangle dépasse le trapèze du triangle m n n', ou de son égal M i i'. Les terres de ce triangle ne pourront être employées au droit de la place qu'elles occupent, mais si nous faisons le triangle K n n' équivalent à M i i', nous voyons que les déblais seront entièrement employés à former le remblai b K n' m. Ces deux surfaces sont limitées par des hachures pour indiquer que les volumes qu'elles représentent sont employés. On voit dès lors qu'il y a entre les deux profils un déficit représenté par la figure K c h g n'.

Entre les profils c et d le déficit est égal au volume entier du remblai.

Dans l'intervalle du profil d au profil e on déduit le triangle A p e du pentagone d e t L I et il reste un déficit représenté par la figure d p j t L I.

Entre le profil e et le profil f on rabat e f o t sur le trapèze e f B A ; mais il arrive, comme entre b et c, que le triangle j t t' du remblai ne trouve pas à s'appliquer sur le déblai et on prend le triangle r q q' équivalent à j t t'; il reste le triangle B q r qui représente le volume de déblai disponible dans l'intervalle de ces deux derniers profils.

Si nous récapitulons ce que nous avons eu trop de déblai, en moins de remblai, nous observons que les 635^{mc} disponibles entre les profils a et b suffiront, non seulement pour combler le déficit de 476^{mc}.45 qui existe entre b et c, mais qu'il restera encore 157^{mc}65 pour porter dans l'intervalle de c à d et recouvrir le trapèze c h y z dont la longueur serait trouvée de 12^{m}.78.

De même les 625^{mc}.90 disponibles entre e et f suffisent pour faire les remblais qui manquent entre d et e, et pour compléter à 0^{m} 04 près, le remblai à faire entre c et d pour la partie représentée par le trapèze y z d I.

La question à résoudre se réduit maintenant à déterminer la position des centres de gravité du trapèze

MNvi et du polygone Kn'ghzy, c'est-à-dire les distances FQ et QE' par rapport à la ligne m'i et celle des centres de gravité du triangle Byr et du polygone ypjtLIz par rapport à la ligne Fq, c'est à dire les distances D'P et FC.

On peut déterminer les centres de gravité ou rigoureusement par le calcul ou approximativement par des constructions graphiques. Voici la manière de procéder pour arriver au résultat exact.

La distance FQ s'obtiendra par la formule suivante:

$$\frac{60}{3} \times \frac{2 \times 18.34 + 2.83}{18.34 + 2.83} = 20 \times \frac{39.51}{21.17} = 20 \times 1,8665 = 37^{m}32$$

La distance QE' ne peut être déterminée rigoureusement qu'après avoir déterminé les centres de gravité du triangle Kgn' et des trapèzes Kchg et chyz.

Pour obtenir le centre de gravité du triangle Kgn' il faut d'abord déterminer sa base Kg, la surface du triangle et par suite sa hauteur on a:

$$bK = \frac{90 \times 6.60}{9.93} = 60, Kg = \frac{(10.13 - 3.79)60}{90} + 3.79 = 8^{m}01$$

La surface du triangle égale celle du trapèze Kbgm-Kbm ou son égal

$$Kbi = 198^{m}60 : Kbgm = (3.79 + 8.01)\frac{60}{2} = 354^{m}$$

(1) Donc $Kgm' = 354 - 198.60 = 154.40$ et la hauteur

$$= \frac{155.40}{\frac{Kg}{2}} = \frac{155.40}{4.005} = 38.79$$

Le centre de gravité de ce triangle sera donc à une distance de

$$Qm' \text{ égale à } Kb - \frac{1}{3} \times 38.79 = 60 - 12.93 = 47^{m}07$$

Le centre de gravité du trapèze Kcgh sera écarté de la

même ligne de

$$Kb + \frac{30}{3} \times \frac{8.01 + 2 \times 13.44}{8.01 + 13.44} = 60 + 16.26 = 76^{m}.26$$

La surface de ce même trapèze sera $= 427.80 - 155.40 = 272^{mc}.40$

Le centre de gravité de $c\,y\,z\,h$ sera écarté de la ligne $Q\,m'$ de $90 + \frac{12.78}{3} \times \frac{13.44 + 2 \times yz}{13.44 + yz}$. yz calculé comme Kg est égal à $11^{m}.77$, d'où résulte que l'expression ci-dessus devient égale à $96^{m}.24$.

Pour avoir maintenant la distance du centre de gravité de l'ensemble de ces trois surfaces à la ligne $Q\,m'$ nous multiplions chacune des surfaces par la distance de son centre de gravité à cette ligne, et nous divisons par la somme des surfaces, ce qui nous donne :

$$\frac{155.40 \times 47.07 + 272.40 \times 76.26 + 157.77 \times 96.24}{155.40 + 272.40 + 157.77} = 74^{m}.03$$

La distance totale de transport est donc de $37.32 + 74.03 = 111^{m}.35$.

On abrègerait beaucoup le travail en faisant la figure sur une échelle assez grande pour permettre de mesurer au compas avec une certaine précision les surfaces et la position des centres de gravité des triangles comme $K\,g\,n'$

Cependant, quelque moyen que l'on prenne pour abréger l'application de la méthode que nous venons d'exposer, elle exige un temps assez considérable que l'on ne peut pas toujours y consacrer. Quand on est pressé on fait le calcul des distances de transport sur le cahier même qui a servi à calculer les déblais et remblais. Voici comment on s'y prend :

Supposons les mêmes profils a, b, c, d, e, f. qui ont fait l'objet du tableau graphique ; on préparera un tableau de calcul disposé comme l'indique la fig. 8 de la planche VI : les cubes de déblai et de remblai sont portés dans les colonnes 5 et 6 On obtient immédiatement dans les colonnes 7 et 8, les cubes de déblai à porter

en travers et en long, ainsi entre a et b, le premier est évidemment le volume entier du remblai 326^{mc}10, le second ou le volume des déblais excédant, à porter en long, est la différence entre 961.20 et 326.10 égal à 635^{m}.10. De b à c, on emploie en travers la totalité du déblai 198.60 et on l'écrit dans la 7e colonne, mais il manque pour former le remblai 676.05 − 198.60 = 477.45 que l'on prend entre les profils a et b et que l'on écrit dans la 9e colonne.

Entre c et d le cube total est en remblai, on l'écrit en entier dans la colonne 9.

Pour les autres volumes on procède comme nous venons de le dire.

Lorsque ce premier travail est fait, on voit que les 635^{mc}10 de déblai à prendre entre a et b suffiront pour faire les 477^{mc}45 manquant entre b et c et de plus 157^{mc}65 sur les 630^{mc},06 qui manquent entre c et d. On écrit ces 157^{mc}65 dans la 10e Colonne en haut de l'accolade dont la pointe répond au cube 630.12 de la 9e colonne.

En opérant de la même manière sur l'excédent 625^{mc}90 qui existe entre e et f, on voit que l'on peut compléter non seulement le déficit 151^{mc}44 qui existe entre d et e, mais encore faire les 472^{mc}41 nécessaires pour combler le déficit 630^{mc}12 de c à d et qu'il reste 2^{mc}05 sans emploi à mettre en dépôt hors de la route.

Pour déterminer la position de la ligne Yz qui doit séparer les déblais pris entre les profils a et b de ceux pris entre les profils e et f, on divise l'intervalle de 76^{m}51, qui sépare les profils c et d en parties proportionnelles aux volumes 157^{mc}65 et 472^{mc}41, on trouve ainsi que cette ligne qui en réalité est à 12^{m}78 de la ligne c h, en serait éloignée de 19^{m}20 et que par conséquent elle serait à 57^{m}21 du profil di

Maintenant pour avoir les distances moyennes

de transport, on considère que les volumes de déblai et de remblai, de part et d'autre de la ligne yz, sont disposés à peu près comme des triangles opposés par leurs sommets et que par conséquent la distance moyenne des centres de gravité doit être sensiblement égale aux deux tiers de la distance comprise entre leurs bases. Ainsi cette distance, à gauche de la ligne de séparation déterminée au paragraphe précédent, est $19^m.21 + 90^m + 60 = 169^m.20$ dont les $2/3$ sont 112.80 ; à droite on a $57.21 + 60 + 60 = 177.21$ dont les $2/3$ sont 118.14.

On arrive ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, à des résultats qui diffèrent peu de l'exactitude puisque l'on obtient $112^m 80$ au lieu de $111^m.85$ trouvés par la méthode exacte, et $118^m 14$ au lieu de $124^m.23$. Mais ce résultat tient à ce que notre hypothèse sur la forme triangulaire des volumes est presque rigoureusement vraie. Si au contraire, les volumes avaient à peu près la forme de triangles opposés par leurs bases, au lieu de prendre les $2/3$ de la distance, il faudrait prendre le $1/3$. S'ils avaient la forme de rectangles, il faudrait prendre la $1/2$. Si enfin il y avait un intervalle sur lequel les déblais compenseraient les remblais, cet intervalle ne devrait pas faire partie de la somme des longueurs dont on prendrait ou les $2/3$ ou le $1/3$ ou la $1/2$; il devrait être compté intégralement.

Il n'arrive presque jamais que les déblais compensent aussi exactement les remblais que nous l'avons supposé. Plus souvent il y a, ou excédent de déblai ou déficit. Dans le premier cas on essaie de quel coté il est le plus avantageux de prendre les déblais et on cesse d'en prendre d'un coté quand la distance de transport devient plus considérable qu'en les prenant de l'autre. Il y a alors un calcul de tatonnement à faire. Cela fait, on suit la méthode que nous venons d'exposer.

Quand au contraire il y a déficit, les remblais venant d'un coté sont séparés de ceux qui viennent de l'autre, non plus par une ligne, mais par un intervalle réservé où le remblai reste à faire. Ce cas est plus simple que celui que nous avons traité, puisque la position des lignes qui limitent les déblais venant de côtés opposés est rigoureusement déterminée.

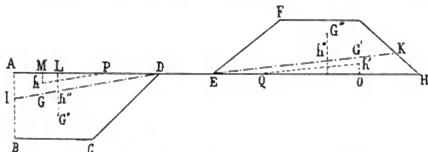
Dans les considérations qui précèdent, nous n'avons eu égard qu'aux distances horizontales des centres de gravité. Leurs distances verticales, ou pour parler le langage de l'Ingénieur, leur différence de niveau doit également entrer comme élément dans l'évaluation des distances de transport, lorsque le centre de gravité du déblai est plus bas que celui du remblai; car évidemment le travail est accru par l'effet de cette différence de niveau, puisqu'il faut non seulement transporter les déblais, mais les élever.

Il est admis par les Ingénieurs, qu'il y a autant de travail pour monter une rampe ayant 20m de base sur 2m.50 de hauteur (rampe au 1/8) que pour parcourir une distance horizontale de 30m. Mais une telle rampe exigeant de la part des ouvriers un travail au dessus de leurs forces, nous préférons une règle admise dans tous les travaux du génie militaire et d'après laquelle une rampe de 20m de base ne doit produire qu'une élévation de 1m65 (à peu près 1/12 de la base) pour être équivalente à une distance de 30m en plaine. Ainsi pour s'élever à une hauteur h on aura une rampe de 12 h de longueur, et comme 20m en rampe sont payés autant que 30m en plaine, chacun des mètres parcourus sur la rampe 12 h devra être payé comme 1m.50 et on comptera à l'ouvrier un parcours de 12 h × 1.50 = 18 h ce qui revient à ajouter 6 h à l'espace réellement parcouru lequel ne peut jamais être moindre que 12 h.

Il résulte de cette dernière observation qu'il faut

quelque fois s'écarter du chemin direct qui conduirait du déblai au remblai pour obtenir le développement du parcours nécessaire à l'établissement de la rampe au douzième. — L'exemple suivant, présente une application de ce principe.

Soit à transporter les terres d'une fouille ABCD, de manière à former un cavalier EFH, nous remarquerons que si nous menons les deux lignes DI et EK, suivant la pente de 12 pour 1, les terres provenant du triangle ADI pourront être



transportées directement et sans détour du déblai au remblai. Si donc il n'y avait pas à les élever, la distance à parcourir, pour aller du déblai au pied du cavalier, serait la distance horizontale du centre de gravité G au point E ou MD + DE. De même pour former le remblai EKH la distance serait dans la même hypothèse égale à EO. Mais à raison de la différence de niveau des centres de gravité G et G', il y a dans ce transport direct les deux rampes GP et GQ pour lesquelles il faut ajouter six fois la hauteur de ces rampes, puisqu'une longueur de 20m compte pour 30m de transport horizontal.

Ainsi en appelant V le volume du déblai ADI, h la distance de son centre de gravité au terrain horizontal; V' le volume du remblai EKH, h' la distance de son centre de gravité au dessus du terrain horizontal. Nous aurons pour le produit du premier de ces volumes par la longueur à parcourir jusqu'au pied du cavalier $V \times (MD + DE + 6h)$ pour le second nous aurons

$V'(EO+6h')$

Il nous reste à considérer les volumes de déblai DIBC et de remblai KEF, nous supposerons le centre de gravité du premier en G' celui du second en G'', l'ordonnée du centre de gravité de G' représentée par h'', celle du centre de gravité G'' par h'''. Le transport ne pourra plus se faire directement car, pour que les rampes aient la pente de 12 pour 1, il faudra qu'elles soient disposées diagonalement. Comme ces rampes restent en saillie sur le talus et ne peuvent être enlevées qu'après que la fouille est terminée, il est impossible de les multiplier à chaque pas, on les espace ordinairement à 20m les unes des autres, de sorte que chaque masse de déblai qui est enlevée par une même rampe à 20m de longueur et s'étend à 10m de part et d'autre de son pied. Le centre de gravité de chacune de ces moitiés est donc à 5m de la rampe dans le sens longitudinal. Dans le remblai les rampes partent du point qui correspond à l'arrivée de la rampe du déblai, il y a donc encore à parcourir sur le remblai dans le sens longitudinal une longueur de 5m

Cela posé, la distance de transport du volume $V_{,}$ jusqu'au pied du cavalier sera $18h'' + DE + 5$ celle du volume $V_{,,}$ depuis le pied du cavalier jusqu'à son centre de gravité sera $18h''' + 5$. Ainsi le produit total des volumes par les distances de transport sera :

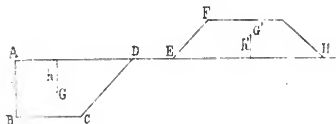
$$V \times (MD + DE + 6h) + V'(EO + 6h') + V_{,} \times (18h'' + DE + 5) + V_{,,} \times (18h''' + 5)$$

En divisant cette expression par le volume $V + V_{,} = V' + V_{,,}$ on aura la distance moyenne à parcourir pour transporter la masse entière de déblai et former le remblai.

En général, on n'a point égard à la diminution de roulage des parties qui sont supérieures à la rampe au douzième. Cependant il y a des cas où cela serait nécessaire ; par exemple, si l'on avait une fouille très large et peu profonde. Dans les circonstances ordinaires on obtient la distance moyenne de

transport en ajoutant à 18 fois la différence de niveau des centres de gravité du déblai et du remblai, l'espace horizontal à parcourir pour aller du bord de la fouille au pied du cavalier, et 10^m pour le chemin parcouru dans le sens longitudinal de la fouille. C'est-à-dire que l'on opère comme nous avons fait pour les volumes V_I et V_{II} qui dans ce cas sont égaux.

Ainsi soient G et G' les centres de gravité des volumes entiers de déblai et de remblai, h et h' les ordonnées de ces



centres de gravité par rapport au plan longitudinal AH, la distance moyenne de transport sera $18(h+h')+10^m+DE$.

Lorsque le sol n'est pas horizontal, s'il va en montant du déblai vers le remblai, il faut que $h+h'$ représente la différence de niveau des deux centres de gravité. Quand au contraire, le sol va en s'élevant, il faut multiplier 18 par la différence de niveau entre G et D augmentée de la différence de niveau qui peut exister entre G' et D. Si G' étoit plus bas que E on n'aurait aucun égard à la position du centre de gravité G' puisque l'on descendrait de D vers G'.

Ainsi que nous l'avons déja dit plus haut l'unité de mesure pour le transport à la brouette est de 30^m. Comme on ne compte que les demi-relais il en résulte que si on évaluait pour chaque mètre cube, la distance en relais et en demi-relais on né-

négligerait quelquefois des fractions de relais assez considérables et que si le volume était de quelques centaines de mille mètres cubes, il y aurait perte, soit pour la partie exécutante, soit pour la partie qui ferait exécuter. Pour éviter cette cause grave d'erreur on multiplie, dans ce cas, le volume par la distance moyenne de transport et on divise le produit par 30, on a ainsi le nombre de mètres cubes transportés à un relai et la dépense s'obtient en multipliant ce nombre par le prix fixé pour le transport d'un mètre cube à un relai.

Exécution des Déblais.
Fouille.

On rencontre dans l'exécution des déblais des terrains de duretés variables. Les uns sont assez facilement pénétrables pour être fouillés avec la bêche ordinaire ou le louchet, d'autres ne peuvent être attaqués qu'avec la pioche ; de plus durs exigent le pic, les rochers forcent à employer des outils de carriers, quelquefois la poudre. Pour déterminer les prix à appliquer à ces divers terrains, il faut nécessairement faire des expériences sur ceux que l'on a à remuer. La terre végétale, le sable, la tourbe seuls sont partout à peu près les mêmes, on admet qu'un ouvrier peut fouiller à la bêche et charger en brouette 15^{mc} de terre végétale, de sable ou de tourbe. Les ouvriers ne sont pas fatigués lorsqu'en 10 heures de travail ils fouillent et chargent ce volume dans ces sortes de terrains. On admet également qu'ils peuvent jeter ces 15^{mc} à 3 et 4^{m} dans le sens horizontal ou à 1^{m}65 dans le sens vertical. Cependant on doit dire que la fatigue est plus grande dans ce dernier cas et qu'il y aurait lieu de payer un peu plus cher.

Dans les comptes du génie militaire avec les entrepreneurs on distingue et on paie la terre à des prix différents, suivant qu'un seul homme suffit ou ne suffit pas à charger la terre, qu'un autre homme transporte à 30m. s'il suffit, on dit que la terre est à un seul homme; s'il faut plus d'un homme à la fouille, si, par exemple il faut deux chargeurs pour un piocheur, on dit que la terre est à un homme ½. Elle peut être à 2 hommes, 2 hommes ½, trois hommes &c.

Lorsqu'on fait un marché de ce genre, c'est-à-dire quand on fixe le prix de la journée de l'ouvrier et que l'on convient de payer la fouille suivant qu'elle sera à un homme, un homme ½, 2 hommes &c., il est nécessaire, lors des expériences qui règlent la nature de la terre, que l'ouvrier piocheur soit choisi par la partie qui fait exécuter le travail, et le chargeur par l'entrepreneur. Ces ouvriers ayant également intérêt, l'un à piocher l'autre à charger le plus vite possible, il s'en suit que les deux ouvriers travaillant tous deux dans le sens des instructions qu'ils reçoivent de ceux qui les emploient, aucune des deux parties ne peut avoir à se plaindre. Pour procéder à cette expérience, le piocheur fouille un certain volume et met la terre en état d'être prise à la pelle; lorsque cela est fait, l'ouvrier de l'entrepreneur charge dans des brouettes la terre piochée. On constate le temps employé par les deux ouvriers; soit A celui employé à piocher, B celui employé à charger, $\frac{A}{B}$ représentera le nombre de piocheurs qui est nécessaire pour que le chargeur travaille sans interruption; $\frac{A}{B} + 1 = \frac{A+B}{B}$ indiquera donc la nature de la terre, ou le nombre d'hommes à employer pour fouiller et charger un mètre cube lorsque le piochage sera nécessaire.

(c. 75) Connaissant le prix de la journée de l'ouvrier, on aura le prix de la fouille et de la charge.

Transport des terres

Transport des terres.

Quand le produit de la fouille ne peut pas être jeté directement au lieu où le remblai doit se faire, on effectue le transport avec des brouettes, des camions, des tombereaux, des bourriquets ou enfin avec des wagons roulants sur des rails en fer.

Transport à la brouette

Les brouettes, que tout le monde connait, sont montées sur une roue et contiennent ordinairement 0m.030 de terre. C'est-à-dire qu'il faut 33 brouettées pour un mètre cube. Cette capacité n'est cependant pas constante, on construit des brouettes de diverses grandeurs, depuis celles qui contiennent 1/20 de mètre cube, ou 1/2 hectolitre, jusqu'à celles qui contiennent 1/35 (Pl. VIII fig 1.2.3 et 4)

Lorsqu'on fait usage de brouettes pour exécuter des transports de terre à une distance de 60m au moins, un seul ouvrier ne peut pas faire le transport pendant qu'un autre ouvrier charge la brouette ; si l'atelier est bien organisé, il faut qu'aucun des ouvriers ne se repose pendant que les autres travaillent, or, si la terre est facile, c'est-à-dire si un ouvrier fouille et charge 15m dans une journée de dix heures de travail, il lui faudra pour fouiller et charger 1mc $\frac{10h}{15}$ et pour un cube N un temps $\frac{10}{15} \times N$. Un autre ouvrier employé au transport du même déblai avec des brouettes contenant ce volume de N et parcourant en 10 heures 30000m parcourra 1m dans un temps égal à $\frac{10}{30000}$. Ainsi le temps employé à parcourir le relai R, aller et retour, sera $\frac{10 \times 2R}{30000}$. Le relai devra donc être réglé à 30m.

Si la brouette contenait 1/20 de mètre cube, ou 0m.05, il faudrait pour la charger 0h 033 pendant ce temps le rouleur parcourrait 100m, ainsi le relai serait de 50m. On suppose qu'un homme conduisant une brouette parcourt 30000m en

10 heures de travail.

Avec une brouette contenant 1/35 de mètre cube, il faudrait que les relais eussent 28^{m}.

On voit donc qu'il y aurait un rapport à établir, dans tous les cas, entre la capacité des brouettes et la longueur des relais, mais en France on admet toujours que les relais ont 30^{m} et cette hypothèse est avantageuse à l'ouvrier parceque les brouettes dont on fait habituellement usage renferment plus de 0^{m}03 de déblai. On suppose que cet avantage compense la difficulté que l'on éprouve souvent à rouler une brouette sur des remblais récents, sur des rampes glissantes. Ce que nous avons dit suffit pour donner les moyens d'évaluer le prix des transports à faire à la brouette, puisque nous avons indiqué la marche à suivre pour calculer la longueur du chemin à parcourir, et que, connaissant la capacité des brouettes employées, le prix de la journée d'un rouleur, on pourra facilement calculer le prix à payer pour transporter 1^{mc} à 30^{m} dans l'hypothèse admise qu'un ouvrier parcourt en 10 heures 30000 mètres.

En effet, on obtiendra d'abord le temps nécessaire pour transporter une brouettée ou 0,03 de terre à 30^{m} en observant que ce temps sera égal au temps employé à parcourir 1^{m} multiplié par le double de cette distance de 30^{m} puisque le rouleur parcourt le relai deux fois : or le temps employé à parcourir 1^{m} est égal à la durée d'une journée de travail divisée par le chemin parcouru dans cette journée ou à $\frac{10^{h}}{30000}$; en multipliant par 60 on aura le temps employé à parcourir un relai, c'est-à-dire à transporter un cube de 0^{m}03 à 30^{m} ; ce temps sera $\frac{60 \times 10}{30.000}$. Ainsi le temps employé à transporter 1^{mc} sera $\frac{60 \times 10}{\frac{30000}{0.03}} = 0^{h}.666$, si donc le rouleur payé 1^{f}50 par jour ou 0^{f}15 par heure, le prix du transport sera $0.666 \times 0.15 = 0^{f}10$

Transport au Camion

Quand on doit transporter des terres à une distance un peu considérable, l'emploi de la brouette devient désa-

désavantageux, et on emploie des camions ou des tombereaux. Le camion est une voiture à deux roues ordinairement traînée par 3 hommes et contenant alors $0^{mc}20$. Pl VIII fig. 7 et 8

Pour calculer le prix du transport, il faut savoir qu'un camion fait 30.000^m par jour, et que le temps nécessaire pour s'atteler au camion, le décharger et le remettre en marche est de 50 à 60" soit pour avoir égard aux pertes de temps 72" ou $\frac{72}{3600} = 0^h02$. Le temps employé pour transporter $0^{mc}20$ à 30^m se composera du temps perdu à chaque voyage 0^h02, plus le temps nécessaire pour parcourir 60^m dans l'hypothèse d'un parcours de 30000^m en 10 heures. D'où résulte que pour transporter 1^{mc} il faudra un temps représenté par l'expression :

$$\frac{0.02 \times \frac{60 \times 10}{30.000}}{0.20} = \frac{0^h.04}{0.20} = 0^h.20$$

trois ouvriers y sont employés, ainsi pour une distance de 30^m le prix sera 0^h20 multiplié par trois fois le prix de l'heure d'un des rouleurs.

Pour un nombre R fois 30^m le temps employé serait

$$\frac{0.02 + \frac{60 \times 10}{30.000} \times R}{0.20}$$

soit $R = 3$ cette expression deviendra :

$$\frac{0.02 + 3 \times 0.02}{0.20} = \frac{0.08}{0.20} = 0^h.40$$

Si les rouleurs sont payés chacun 1^f50, ensemble 4^f50 le transport à 3 relais reviendra à $0^h.40 \times 0^f45 = 0^f.18$

Avec la brouette le transport à trois relais serait de 3 fois 0^f10 ou 0^f30, on voit donc que le camion a un grand avantage, sur la brouette pour un transport à 90^m. Il en a

même pour un seul relai puisque le prix n'est alors que de 0.05 Cependant on n'en fait pas usage pour des distances de moins de 100m Le motif en est facile à comprendre, le chargement ne se fait que par deux chargeurs qui, pour remplir un camion vide pendant le trajet du camion plein, emploient un temps donné par l'expression $\frac{10\times0.2}{2\times15} = 0^h066$ (0^m20 étant comme nous l'avons vu la capacité du camion et $\frac{\frac{0.2}{2\times15}}{10}$, le volume chargé par 2 hommes en une heure) les rouleurs qui parcourent 30.000m par jour ou 3000m à l'heure, parcourent pendant ce temps de 0^h066, $3000^m \times 0.066 = 198^m$ dont la moitié à charge et la moitié à vide ; ce qui fixe comme on voit le relai à 100m environ.

Un autre motif pour n'employer que rarement les camions, c'est que l'on ne peut s'en servir qu'à transporter des terres, et que par conséquent il faut les construire exprès pour n'en rien retirer à la fin des travaux, tandis que les brouettes et les tombereaux au contraire se trouvent partout. Les camions conviennent lorsqu'on a à exécuter une masse de déblais assez considérable pour qu'on puisse les user ou au moins retirer de leur emploi un bénéfice qui couvre, et au delà, les frais d'exécution.

Transport au tombereau.

On emploie ordinairement pour transporter des terres à une grande distance des tombereaux attelés d'un cheval et contenant $0^m.50$. Cependant il y a des localités où l'on en emploie de plus grands. Pour calculer le prix du transport avec un tombereau il faut, non seulement en connaître la capacité, mais encore savoir qu'un tombereau parcourt 30.000m par jour et qu'il faut $0^h.033$ pour le décharger et le remettre en marche

Avec ces données, et en supposant que le tombereau a une capacité N et qu'il est chargé par un nombre d'hommes représenté par H, on trouve que le temps T nécessaire pour transporter $0^m.50$ à R fois 30m se compose.

1°. Du temps employé au chargement, lequel ex-

exprimé en fraction d'heure est $\frac{10}{15H} \times N$;

2°. Du temps employé au parcours R fois 30m aller et venir ou $R \times \frac{60 \times 10}{30.000} = 0^h.02\,R$

3°. Du temps perdu, ou $0^h.0.33$ de sorte que pour 1m.c. le temps employé sera :

$$T = \frac{\frac{10N}{15H} + R \times \frac{60 \times 10}{30.000} + 0^h 033}{N} = \frac{\frac{10N}{15H} + R \times 0{,}02 + 0{,}033}{N}$$

Si, nous appliquons cette formule au cas que nous avons pris pour exemple lorsqu'il s'agissait du camion, que nous ayons trois chargeurs et que le tombereau ait une capacité de 0m.50 nous trouverons :

$$T = \frac{\frac{5}{45} + 3 \times 0{,}02 + 0^h 033}{0.50} = \frac{0^h 111 + 0{,}06 + 0.33}{0{,}50} = 0^h 408$$

Supposons donc le tombereau payé 6fr. avec son conducteur qui travaille à le charger : le prix par heure sera 0f.60, ce qui donnera pour le prix de revient par mètre 0f.2448, c'est-à-dire plus cher qu'au camion, moins cher qu'à la brouette.

Si l'on n'avait qu'un seul homme à la charge, c'est-à-dire si le tombereau n'était chargé que par son conducteur, le prix de revient serait plus élevé, il le serait un peu moins avec un chargeur adjoint au conducteur et enfin moins encore avec deux chargeurs comme nous l'avons supposé. On emploie rarement plus de trois chargeurs parcequ'ils se gênent quand ils sont plus nombreux.

Il est essentiel d'observer que plusieurs tombereaux doivent être employés à la fois au même atelier quand le charretier ne charge pas seul, sans quoi les chargeurs se reposeraient pendant le trajet du tombereau. Le nombre de ces tombereaux doit être proportionné à la longueur du transport. Il faut que le temps employé au chargement, lequel est donné dans la valeur

T par $\frac{10N}{15H}$, soit égal au temps employé à parcourir le relai; plus au temps perdu, c'est-à-dire que l'on ait $\frac{10N}{15H} = R \times 0^h.02 + 0^h.033$. Si au moyen de cette formule nous cherchons à quelle distance il conviendra d'employer deux tombereaux contenant $0^m.50$, en supposant un chargeur avec le charretier, nous trouvons $R = \frac{0.166 - 0.033}{0.02} = 6.65$ puisque la valeur de chacun des relais est de 30^m pour six relais 65, la distance sera de $199^m.50$.

Pour trouver à quelle distance le tombereau doit être préféré au camion, il faudrait multiplier l'expression T, du temps employé à parcourir un nombre de relais R avec un tombereau; par le prix de la journée du tombereau, ajouter le prix de la fouille en ayant égard à ce que le conducteur travaille à la fouille et que la charge faite par trois ouvriers au lieu de coûter 0.10 ne coûte que les 2/3, soit $0^f.066$, puisque le salaire du conducteur est compté dans le prix du tombereau; égaler le résultat ainsi obtenu au résultat analogue pour le camion.

Dans les hypothèses faites plus haut, nous aurions:

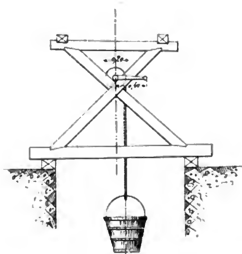
$$0.10 + \frac{0.02 + R \times 0.02}{0.20} \times 0.45 = 0{,}066 + \frac{R \times 0{,}02 + 0{,}011 + 0{,}033}{0{,}5} \times 0{,}60$$

d'où nous tirons R = 4 relais 40. D'après cela, le camion devrait être employé jusqu'à 132^m et le tombereau au delà, dans le cas, nous le répétons, où le nombre de chargeurs serait de trois y compris le conducteur.

Une observation essentielle à faire c'est que les tombereaux ne peuvent pas monter une rampe ayant moins de 20^m de base sur 1 de hauteur, ainsi pour un relai de 20^m de longueur en rampe comptée pour 30^m de transport horizontal, un tombereau ne monte que 1^m

Transport au bourriquet.

Un bourriquet est une machine composée d'une caisse ou panier que l'on remplit et d'un treuil qui sert à l'élever. Le treuil a ordinairement un arbre de $0^m.60$ de circonférence et de 1^m de longueur.



une manivelle de 0^m40 de rayon, la corde a 0^m10 de circonférence et le panier contient 0^m033 de terre.

On se sert de cette machine pour élever la terre verticalement ; elle exige cinq hommes, savoir 1 pour remplir le panier, deux pour tourner la manivelle, deux autres pour décrocher le panier et le vider, ces quatre derniers alternent.

Le panier s'élève de 5^m en 20 secondes, ou $0^h.00555$, il descend de 5^m en 15" ou $0^h.00416$. Pour accrocher une caisse pleine et décrocher une vide, il faut 20" ou $0^h.0056$ pour décharger la caisse pleine, il faut 25" ou 0,00.700, y compris le temps perdu.

Nous avons vu qu'une hauteur de 1^m65 correspondait à un relai de 20^m en rampe, nous supposerons donc la hauteur à laquelle les terres doivent être élevées divisée en relais de 1^m65

Pour monter la caisse ou le panier à $1^m.65$,

il faudra .... $0^h.00183$

Pour la descendre .... $0^h.00138$

Pour la vider .... $0^h.00700$

Pour l'accrocher et la décrocher ..... $0^h.00560$

Total ..... $0^h.01581$

D'après ces résultats, pour élever un volume de $0^m.033$ à R relais, il faudra un temps.

$$t = R\,(0^h.00183 + 0^h.00138) + 0^h00700 + 0^h00560) = R \times 0{,}00321 + 0.01260$$

et pour élever 1^{mc} il faudra un temps.

$$T = \frac{t}{0.033} = \frac{R \times 0.00321 + 0.01260}{0.033}$$

Si les cinq ouvriers sont payés 1^f50 et s'il y a trois relais

$$T = \frac{3 \times 0.00321 + 0.01260}{0.033} = 0^h\,673$$

et le prix de l'élévation de 1^{m} cube à trois relais de 1^{m}65 est de 0,673 × 0,75 = 0^{f}504, si les cinq ouvriers sont payés chacun 1^{f}50 par jour, et ensemble par heure 0^{f}.75.

Transport au wagon. Les transports aux wagons sont donnés dans le cours de chemins de fer. Je me bornerai donc à dire que le mètre cube transporté à 100^{m} coûte ordinairement 0^{f}03, et que les faux frais pour perte de temps et pour déchargements sont de 0^{f}25 à 0^{f}30 par mètre cube quelle que soit la distance.

Chapitre 3.

Construction des Chaussées.

La Chaussée est, comme nous l'avons déjà dit, la partie d'une route spécialement affectée au passage des voitures, et à laquelle par cette raison on donne une solidité suffisante pour résister aux causes de destruction qui agissent continuellement pour la détruire, mais particulièrement pour supporter sans dépression sensible le poids des roues. On distingue deux modes de consolidation essentiellement différents:

Dans l'un, les matériaux employés ont des formes régulières; ils sont assez volumineux pour avoir de la stabilité et sont posés en liaison les uns avec les autres, c'est ce que l'on nomme une chaussée pavée.

Dans l'autre les matériaux sont irréguliers et la couche supérieure, au moins, est formée de petits morceaux qui n'acquièrent de la stabilité que par leur enchevêtrement résultant ou d'une pression ou d'un choc et par la cohésion d'une gangue qui les lie. On donne à cette chaussée le nom de chaussée en empierrement.

Pour que l'on se fasse une idée exacte des effets de ces deux sortes de chaussées, nous croyons utile de présenter dans un tableau

le rapport entre la force de tirage et les poids transportés sur les diverses chaussées et sur les chemins de fer.

Chemin de fer	Chaussée pavée		Chaussée en empierrem.t		Rails creux posés sur les routes ordinaires
	Ordinaire	Très bonne	Ordinaire	Très bonne	
1 à 250	1 à 70	1 à 100	1 à 16	1 à 50	1 à 125

Les chemins de fer ont, comme on voit, un immense avantage sur les chaussées pavées, et celles-ci un très grand sur les chaussées en empierrement. Mais d'un autre côté, ces dernières occasionnent de moindres chocs aux voitures que les chaussées pavées, elles usent moins les roues et fatiguent moins les chevaux de sorte qu'en réalité l'avantage des unes sur les autres n'est pas tout-à-fait dans le rapport des chargements.

La grande différence entre les poids transportés sur ces deux chaussées tient à ce que celles en empierrement, même les plus dures se compriment légèrement sous la charge et qu'ainsi les roues ont toujours à gravir le petit plan incliné qui résulte de cette compression, tandis que sur les chaussées pavées, cette compression continue n'a pas lieu, et que les inégalités des pavés offrant successivement des pentes et des rampes, les voitures acquièrent en descendant ces petites pentes une partie de la force vive nécessaire pour franchir les rampes qui leur sont opposées.

On donne ordinairement aux chaussées 5.m de largeur, mais on les élargit aux abords des grandes villes et on porte cette largeur à 7m, même à 9m et au-delà, suivant la fréquentation. Le relargissement est plus nécessaire avec les chaussées pavées qu'avec celles en empierrement, parceque les premières sont limitées invariablement et cessent tout-à-coup, tandis que les chaussées en empierrement tendent à s'élargir par l'effet de la mobilité des petits matériaux

qui roulent continuellement sur les accotements et y sont enchassés.

Chaussées pavées. _ On emploie à la construction des chaussées pavées toutes les pierres dures, mais particulièrement le grès, l'arkose, le granit, le basalte, le porphyre; le schiste, la pierre calcaire, les cailloux roulés &c. Ces derniers se mettent en œuvre tels qu'ils sont, pourvu qu'ils aient des dimensions convenables; tous les autres pavés sont en général taillés de forme cubique: les dimensions variant de 0.08 à 0m.25.

Les pavés, quelle que soit leur nature et leur forme, se posent sur une couche de sable à laquelle on donne de 0m. 10 à 0m. 15 ou 0m. 20 d'épaisseur. Ce sable, par son incompressibilité et sa semi fluidité a la propriété de répartir le poids que supporte un des pavés sur une partie de la forme beaucoup plus étendue que la base inférieure du pavé même, et parconséquent d'empêcher l'enfoncement des pavés sous la charge des roues.

Quand on construit une chaussée pavée on doit s'attacher à réunir les pavés de même forme et de même dureté: sans cette précaution, ils s'usent inégalement, les plus tendres forment des trous dans lesquels tombent les roues des voitures; ces chocs accélèrent la destruction des pavés tendres et amènent par suite la dégradation des pavés voisins que nous supposons de bonne qualité.

Excepté dans les rues des villes où le pavage s'étend jusqu'aux maisons, les chaussées n'occupent que le milieu de la route et des accotements ou des banquettes en terre les bordent des deux côtés. Pour que les roues des voitures qui passent de la chaussée sur l'accotement ou réciproquement ne culbutent pas les pavés extrêmes, on donne à ceux qui sont ainsi placés des dimensions plus fortes que celles des autres pavés: ils portent, à cause de leur position le nom de bordures.

Aux environs de Paris, on donne ordinairement aux bordures.

en longueur 2 fois	la dimension d'un pavé ou	0m.44
en largeur 1 fois ½		0.33
en épaisseur 1 fois ½ ou un peu moins		0.33

Monsieur Polonceau père, et après lui quelques Ingénieurs ont réduit la largeur à celle des pavés. Ce qui permet de liaisonner les bordures avec les pavés.

Pour reconnaître la qualité des pavés, on indique plusieurs moyens:

1°. La pesanteur spécifique; ainsi les pavés durs employés à Paris pèsent 2540 K environ, tandis que les pavés tendres de Fontainebleau ne pèsent que 2390^{K} le mètre cube.

2°. La quantité d'eau qu'ils absorbent lorsqu'ils sont immergés. Cette quantité est de 1/569 pour les plus durs et de 1/51 pour les plus tendres.

3°. Le son; Lorsqu'un pavé est frappé avec un marteau, il rend un son d'autant plus sourd qu'il est plus tendre, ou qu'il est fêlé.

Pour exécuter une chaussée pavée, on creuse dans la route un encaissement auquel on donne une profondeur telle qu'il se trouve au dessous du pavé et des bordures un intervalle de 0^{m}. 10 à 0^{m}. 20 pour recevoir la couche de sable destinée à supporter les pavés. (Pl. VII. fig. 1)

Les pavés sont placés sur cette couche de sable par rangées perpendiculaires à la direction de la route et s'étendent d'une bordure à l'autre. On apporte la plus grande attention à croiser les joints d'une rangée sur ceux de la rangée précédente. Pour un mètre carré de pavés cubiques de 0^{m}. 22 à 0^{m}. 23, on emploie 0^{m}18 de sable, savoir: 0^{m}13 pour la forme, 0^{m}.03 pour les joints et 0^{m}02 pour recouvrir le passage, afin d'achever de remplir les joints qui ne peuvent jamais être complètement garnis quand on pose les pavés.

Quand, au lieu d'employer des pavés neufs, on emploie des pavés déjà usés, l'épaisseur qui manque à ces pavés est remplacée par du sable, de manière à conserver toujours la même épaisseur de chaussée.

La pose des pavés se fait à l'aide d'un marteau, qui présente d'un bout la forme d'une houe allongée et de l'autre une tête. La houe sert à préparer la place du pavé, la tête à l'assurer quand il est placé ; on garnit les joints en sable soit avec la houe, soit avec la main.

On prescrit ordinairement de ne donner que 7 à 8 millimètres aux joints, mais pour se tenir dans ces limites il faudrait souvent, à cause des faces bombées des pavés, que ces pavés touchassent les uns contre les autres, ce qui aurait plus d'inconvénient que de faire des joints de 0.m02 à 0.m025. D'un autre côté, on ne pourrait faire disparaître les faces bombées qu'en taillant les pavés, de sorte que l'on accorde la tolérance dont nous venons d'indiquer la limite (0.02)

Les joints d'un rang doivent toujours correspondre au milieu des pavés des deux rangs contigus. (Fig 2)

Dans les carrefours très fréquentés, pour éviter d'avoir des rangs de pavés dans la direction que suivent les roues des voitures, on place les rangs parallèles aux diagonales du carrefour.

Pour donner de la stabilité à un pavage neuf avant le passage des voitures, on l'affermit et on le dresse en frappant successivement sur chaque pavé avec une hie du poids de 35 à 40 K. C'est après cette opération qu'on recouvre le pavage d'une couche de sable de 0.02 d'épaisseur.

Dans les chaussées fendues, c'est-à-dire ayant un ruisseau au milieu ; et dans les chaussées à revers, le ruisseau est la partie qui fatigue le plus, parceque les roues y retombent toujours, surtout quand la route est en pente. On construit ordinairement ce ruisseau comme l'indique la figure 5.bis, c'est-à-dire que les pavés sont placés alternativement, de manière à avoir un tiers de leur largeur d'un côté du ruisseau et les deux tiers de l'autre. Cette disposition

est convenable en rase campagne où les ruisseaux ne re-çoivent que de l'eau de pluie ; mais dans les villes, les barrages successifs que forment les pavés, retiennent les eaux ménagères dans les joints que creusent les eaux de pluie dans les moments d'orages ou d'averses abondantes &a et ces eaux ménagères, devenues stagnantes, se corrompent et rendent les ruisseaux infects.

Pour remédier à ces inconvénients, on a essayé de placer une ligne continue de joints dans l'axe du ruisseau. (Fig.5). Ce moyen n'a réussi que dans les rues qui ne sont pas fréquentées par les voitures, mais dans les rues très passagères, le ruisseau est bientôt creusé de plusieurs centi-mètres de profondeur par les roues des voitures, suivant tou-jours exactement la même trace.

L'emploi de ruisseaux faits avec des pavés taillés ayant une longueur égale à celle d'un pavé et demi, a beaucoup mieux réussi ; le ruisseau a plus de largeur, sa forme courbe permet aux roues de ne pas passer invariablement à la même place, il n'y a pas de joint dans l'axe. Il résulte de là que les pavés durent plus longtemps et que l'eau s'é-coule mieux.

Quand on exécute des trottoirs le long des maisons pour les piétons, le ruisseau s'appuie contre le trottoir, ou il est placé dans le trottoir même, au moyen d'un refouil-lement creusé dans les bordures en granit ; ce dernier système qui avait paru devoir se répandre, a été abandonné, parceque les ruisseaux trop creux se remplissaient d'ordures et qu'il était fort difficile de les nettoyer.

(1) Dans quelques localités on emploie les cailloux roulés au pavage des rues. Ces pavés se placent dans certains endroits verticalement et le gros bout en bas, comme dans la fig.3. dans d'autres, le gros bout est en haut. (Fig. 4)

mais ils sont légèrement inclinés afin que la pression ne tende pas à les faire enfoncer. Le premier mode est plus solide, mais il produit un pavage sur lequel on marche avec peine, le second s'emploie surtout quand les cailloux sont pointus des deux bouts.

La quantité de sable qui entre dans un mètre carré de pavage en cailloux roulés est beaucoup plus grande que dans les pavages en grès cubiques, puisque les vides sont plus grands entre les pavés et qu'il faut en dessous une couche de sable au moins aussi épaisse dans un cas que dans l'autre.

L'épaisseur de la couche de sable à employer sous les pavés varie suivant la nature du sol dans lequel la forme est creusée. Lorsqu'il est résistant, il suffit d'une couche de 0m10, tandis que s'il est argileux ou marneux, on en emploie jusqu'à 0m50 comme dans la rue Lafayette.

Chaussées en empierrements. Il y a 30 ou 40 ans les chaussées, quelle que fut leur largeur, se construisaient généralement avec deux sortes de pierres, souvent avec trois. Dans ce dernier cas, les pierres que l'on plaçait dans le fond de l'encaissement disposé au milieu de la route pour les recevoir. (Fig. 6) étaient plates et servaient de base ou de fondation à la chaussée pour empêcher les petites de pénétrer dans le sol. Actuellement, ce système n'est applicable que dans les sols peu résistants.

Sur ces pierres plates, quand on avait besoin d'y recourir ou sur le sol même quand il n'était pas nécessaire de le consolider, on posait (Fig. 6 et 7) d'autres pierres ayant autant que possible, la forme pyramidale posées sur leur base, le sommet en haut: elles devaient avoir de 0m15 à 0m20 de hauteur, et le plus d'assiette possible. Elles présentaient ainsi des aspérités offrant peu de surface. Postérieurement on a

remplacé la couche de fondation en pierres pyramidales par des pierres cassées à la grosseur de 8 ou 10 centimètres.

Sur cette fondation on répandait la couche de pierrailles sur laquelle le roulage se fait. Cette couche doit avoir de 15 à 20 centimètres.

Il est bon de répandre les pierrailles par couches, de les recouvrir, ou de détritus, ou de sable graveleux, ou de terre sablonneuse sur deux ou trois centimètres d'épaisseur, et de les comprimer au fur et à mesure à l'aide ou de hies ou de rouleaux en fonte, ou même en faisant passer dessus des voitures de roulage; dans l'un ou l'autre cas il faut constamment refermer les ornières dès qu'elles se forment par le déplacement des pierrailles.

Ces dispositions sont encore en usage dans les contrées dont le sol est médiocrement résistant et dans celles où le cassage des pierres est coûteux.

Les chaussées en empierrement que nous venons de décrire, ont été quelquefois comprises comme les chaussées pavées, entre deux lignes de bordures auxquelles il était avantageux de donner la forme de prismes triangulaires (Fig 6 et 7) afin qu'elles eussent plus d'assiette. Les arêtes parallèles étaient placées dans le sens de la chaussée, lorsqu'elles avaient la forme de prismes rectangulaires, on les posait sur une arête afin qu'elles n'offrissent pas en dessus une surface horizontale formant enclume sur laquelle se seraient écrasées les pierres cassées. Dans un cas, comme dans l'autre, ces bordures étaient appuyées par des pierres cassées de diverses grosseurs, les plus faibles dessus, on y a renoncé parceque, malgré toutes les précautions, elles contribuaient au broiement des matériaux et qu'elles formaient saillie lorsque la chaussée s'usait. On les a successivement détruites en les cassant sur place dans les anciennes chaussées.

Depuis quelques années on a fait beaucoup moins usage

des couches de fondation, et maintenant il arrive très fréquemment que l'on emploie exclusivement à la construction des chaussées des pierres cassées comme celles qui forment la dernière couche dans le système que nous venons de passer en revue (Fig. 8) ou des cailloux qu'on trouve naturellement à la grosseur indiquée plus haut. Il est plus nécessaire dans ce dernier cas que dans les autres, de comprimer l'empierrement avant de le livrer à la circulation

Les routes avec fondations en pierres plates doivent avoir de 0m40 à 0m45 d'épaisseur, celles avec une simple fondation en pierres coniques ont environ 0m30 à 0m35; enfin celles en petits matériaux ont de 0m 15 à 0m 30 suivant le poids des voitures qu'elles peuvent avoir à supporter, et suivant la nature du sol; l'épaisseur ordinaire est de 0m 20

Si on compare ces trois systèmes, on voit qu'à épaisseur égale de chaussée, le troisième doit couter plus cher, à moins que les pierres ne se trouvent naturellement de petite dimension, on voit aussi que si le sol est peu résistant, les petites pierres s'y enfonceront et s'y perdront dès que la route sera abandonnée un certain temps sans entretien, mais d'un autre côté, le roulage y sera plus égal et si le sol est bon, on aura pu donner à la chaussée une épaisseur moindre que dans les autres systèmes et cependant la route s'usera jusqu'à la fin, sans que le roulage en souffre.

Avec les routes fondées en grosses pierres, la couche supérieure lorsqu'elle s'aminçit, soit par défaut d'entretien, soit par imprévoyance se trouve comprise entre les roues des voitures et les pierres qui font l'office d'enclumes et ne tarde pas à être broyée: Il y a dans ce cas une consommation plus grande de matériaux et le roulage est extrêmement fatigué par les cahots.

On peut conclure de là que le premier système (Fig. 6) ne convient que dans les terrains de mauvaise qualité, que le second (Fig 7) doit être employé surtout dans les terrains médiocres

où l'on peut craindre encore le défoncement de la forme, enfin qu'il convient d'appliquer le troisième (Fig. 8.) dans les localités où les petits matériaux sont faciles à obtenir, dans celles où le sol est résistant et particulièrement dans les contrées où les voitures de roulage sont peu chargées, parceque l'on peut donner aux chaussées une épaisseur qui ne pourrait pas être admise même dans le second système. Pour diminuer la dépense on emploie quelquefois des pierres cassées de grosseurs différentes. Celles du fond de la forme sont cassées à une grosseur telle, qu'elles passent dans un anneau de 0m.08 de diamètre. tandis que celles du dessus doivent passer dans un anneau de 0m06 de diamètre, et même quand elles sont très dures dans un anneau de 0m.04.

On emploie à la formation des empierrements à peu près toutes les pierres dures; celles qui conviennent le moins sont celles qui sont attaquées par la gelée et celles qui sont trop dures pour former les détritus nécessaires à leur liaison. les meilleures sont les calcaires très durs, le silex anguleux non fragile, le quartz, le granit, le porphyre, le trapp, même certains grès très durs

Les petites pierres employées à former la couche supérieure des chaussées ou même les chaussées entières, comme nous l'avons vu, sont cassées de manière à pouvoir passer dans tous les sens à travers un anneau de 0.06 de diamètre. Ces pierres doivent être anguleuses et entièrement purgées de terre argileuse.

1° Anguleuses, parcequ'elles se lient mieux les unes avec les autres et que les éclats qui proviennent de la rupture des angles forment des détritus qui contribuent à lier les pierres entr'elles.

Purgées de terre argileuse parceque s'il y en avait entre les petites pierres, cette terre se gonflerait dans les temps humides. écarterait les pierres et désunirait la chaussée. Cet effet destructif de la liaison des chaussées serait plus sensible encore à l'époque

des gelées faibles et du dégel.

Lorsqu'on est forcé d'employer des cailloux roulés, il faut nécessairement suppléer aux détritus qui ne se produisent que difficilement, par du sable, du gravier &c. Il est même bon de casser une partie des cailloux pour faciliter la formation des détritus.

Il résulte d'expériences faites avec soin que les petits matériaux employés purs à la construction des chaussées, présentent, avant d'être mis en œuvre, des vides dont le volume, comparé au volume total est de 0m.38 par mètre pour le gravier et de 0m.47 pour les pierres cassées. Aussi arrive-t-il qu'un mètre cube de ces matériaux n'occupe plus que 0m.71 quand l'enchevêtrement est complet, c'est-à-dire quand les morceaux supérieurs ont été réduits par les roues des voitures en petits éclats qui remplissent en partie les vides des couches inférieures. D'après cela, on voit combien il y a d'avantage à remplir les vides au moment de la construction.

Quel que soit le mode de construction des chaussées, il importe d'éviter au roulage la fatigue que cause aux voitures le passage sur un empierrement neuf et la perte résultant de l'écrasement des matériaux, et par conséquent de ne livrer les routes neuves à la circulation qu'après la consolidation des chaussées. Pour opérer cette consolidation on se sert de rouleaux en fonte traînés par des chevaux. Ces rouleaux doivent être disposés de manière que l'on puisse les charger à volonté et faire varier leur poids de 3000k à 6000k. La forme de ces rouleaux peut être celle indiquée Pl. VIII (Fig. 5 et 6). — Pour faciliter la prise, on recouvre les petits matériaux d'une couche de détritus ou de calcaire écrasé ou de sable.

Consolidation

Consolidation des Routes dans les mauvais Terrains

Lorsqu'une route traverse un sol marécageux dans lequel la vase ou la tourbe ont une grande épaisseur, on diminue les chances d'affaissement en plaçant sur le terrain, avant l'exécution des remblais, deux lits de fascines disposées diagonalement et à angle droit l'un sur l'autre. Ces fascines doivent avoir une longueur suffisante pour qu'elles s'étendent d'un coté à l'autre de la route en dépassant la limite du remblai. Un tel remblai par sa légèreté et la liaison de ses parties, diminue les chances d'affaissement, empêche les tassements partiels et assèche la route. Sur ces fascines il convient de faire les remblais avec des terres légères.

Chaussée sur un sol de Glaise

Une chaussée placée directement sur un sol glaiseux est exposée à des changements de forme continuels, et n'est par conséquent jamais consolidée, si on n'empêche pas les eaux pluviales, qui pénètrent dans le fond de la forme, de séjourner sur la glaise et la détremper. Pour atteindre ce résultat, si la route a de la pente, on fait de distance en distance des pierrées qui, partant de la forme, vont aboutir par la ligne de plus grande pente, dans les fossés, en passant sous les accotements; si la route est horizontale on dispose le fond de la forme avec pente et contre pente, et l'on fait partir les pierrées des points bas artificiels que l'on a créés, en les dirigeant alors normalement à la route.

On nomme pierrées des rigoles souterraines formées de deux petites culées en pierres sèches écartées de 0m.10 à 0m.20

l'une de l'autre et supportant des pierres plates qui recouvrent le vide entre les culées.

Cassis. – Quand une route coupe à fleur du sol un vallon dont le thalweg est généralement à sec, on fait passer les eaux qui coulent accidentellement dans un cassis ou ruisseau pavé placé au point où les deux pentes inverses de la route viennent se rencontrer. Ce pavé doit remonter sur les deux pentes au delà du niveau des plus hautes eaux ; ses extrémités surtout celles d'aval, doivent être défendues contre les affouillements si la pente du thalweg est considérable. Quand au contraire elle est faible, pour empêcher le dépôt sur la route du limon que les eaux entraînent, on donne au cassis une pente plus forte que celle de la vallée, afin que les eaux, ayant à la traversée de la route une vitesse plus grande que leur vitesse ordinaire, n'abandonnent pas sur la chaussée les matières qu'elles tiennent en suspension.

Écharpes. Les routes en pays de montagne sont exposées à être ravinées par les eaux pluviales qui s'accumulent dans les frayés des roues, quand leur pente uniforme n'est interrompue nulle part. Pour prévenir cet inconvénient, on construit, de distance en distance suivant la pente de la route et l'abondance de l'eau des Écharpes destinées à arrêter les eaux qui coulent dans le sens de la route et à les rejeter dans les fossés. Ces écharpes sont des bourrelets formés de petits matériaux comme ceux qui composent la couche supérieure de l'empierrement. Ce bourrelet est très adouci du côté de la vallée, afin de ne pas offrir un obstacle aux voitures qui montent ; du coté d'amont, au contraire, il y a une pente d'environ 0m25 contraire à celle de la route, afin d'arrêter les eaux. La direction d'une écharpe doit être celle de la ligne de plus grande pente. Pour la tracer, supposons que AB (Pl. VII. Fig. 11) soit l'axe d'une route ayant une pente P par mètre, que CA soit la direction

d'un profil en travers suivant lequel la route a une pente transversale p. Je chercherai, pour ces deux pentes, quelle base répond à une même hauteur, à 1ᵐ par exemple, et pour cela, je diviserai 1ᵐ par la pente par mètre, j'aurai ainsi ces bases qui seront $\frac{1}{P}$ suivant l'axe, $\frac{1}{p}$ suivant le profil en travers, je porterai les longueurs ainsi obtenues, la première sur la ligne AB de A en D, la seconde sur le profil en travers de A en E, je joindrai D et E; la ligne DE sera une horizontale tracée sur le plan incliné d'un des revers de la route. Ainsi la ligne de plus grande pente sera la ligne AF menée du point A perpendiculairement à DE.

Si la route est bombée, l'écharpe aura la forme d'un chevron brisé; si elle est à revers, elle n'aura qu'une seule direction et sera alors véritablement une écharpe.

Quand les routes sont entretenues de manière qu'il n'y ait jamais assez de boue pour forcer les eaux à couler longitudinalement sur la chaussée, on doit supprimer les écharpes qui gênent beaucoup la circulation des voitures.

Fossés en gradins. Lorsqu'une route a une pente de plus de deux centimètres par mètre et que cette pente se prolonge sur une grande longueur, si les fossés ne peuvent pas déverser latéralement les eaux qu'ils reçoivent, ces eaux s'accumulent et coulent alors avec une vitesse telle qu'elles ravineraient les fossés si on ne les disposait pas d'une manière particulière. Au lieu de leur conserver la pente de la route, on les creuse par gradins comme l'indiquent les fig. 9 et 10 Pl. VII. On prévient les affouillements au pied des murs de chute construits en pierres sèches, en formant des enrochements qui garantissent le fond et les talus jusqu'à la distance où l'accélération de vitesse produite par la chute pourrait être dangereuse.

Chapitre 4.

Chapitre 4.

Entretien des Routes.

Nous avons vu qu'il y avait deux espèces de chaussées d'une construction entièrement différente. Les chaussées pavées et les chaussées en empierrement. Les modes d'entretien applicables aux unes et aux autres ne sont pas moins différents que ceux de construction.

Chaussées pavées. – Les premières sont construites, soit en pavés cubiques, soit en pierres dures de différentes natures, soit en cailloux roulés provenant des bords de la mer ou du lit des torrents. Quels que soient les matériaux dont elles sont formées, les travaux à faire pour les entretenir s'exécutent de la même manière. Il n'y a jamais eu discussion sur le système de construction, il n'y en a pas eu davantage pour le système d'entretien, seulement on a varié sur la proportion à établir entre les divers travaux d'entretien.

Relevés à bout. Les travaux d'entretien consistent soit en relevés à bout, soit en entretien simple.

On entend par relevé à bout un travail qui consiste à démonter une portion de chaussée, à en enlever les pavés pour découvrir la forme, à piocher cette forme pour lui rendre la semi fluidité qu'elle a perdue, à remplacer le sable altéré par le mélange avec la boue et les pavés usés et à reconstruire ensuite la chaussée, comme sur une route neuve.

Les précautions à prendre pour que le travail soit bien fait consistent

1°. à mettre au rebut tous les pavés cassés, déformés, &

mauvaise qualité, de dimensions trop faibles. (Ceux que le frottement a amenés à avoir moins de 0m.16 de longueur de queue sont mis au rebut à Paris.)

2°. A piocher la forme de sable sur une profondeur uniforme, après avoir enlevé les parties terreuses, et à lui rendre son épaisseur par un apport de sable pur.

3°. A employer d'abord un ou deux rangs de pavés neufs pour faire connaître le point où commence le relevé à bout, puis tous les anciens pavés que l'on dispose autant que l'on peut, de manière à réunir ceux de même dureté et de mêmes dimensions.

4°. A terminer le travail par tous les pavés neufs.

Si le relevé à bout s'étendait à une grande distance, on interromprait les parties en vieux pavés par des parties en pavés neufs, afin de n'avoir pas à transporter les premiers loin du lieu d'où ils auraient été tirés.

La quantité de sable à rapporter varie suivant que l'on emploie du pavé neuf ou du vieux, puisque les premiers ont plus de longueur de queue que les seconds. A Paris on rapporte pour les parties en pavés neufs 0m.07 de sable, dont 0m.02 pour rafraîchir la forme, 0m.03 pour les joints et 0m.02 pour recouvrir l'ouvrage.

Pour les parties en pavés vieux on emploie 0m.10 de sable; savoir 0m.07 comme ci-dessus pour rafraîchir la forme, faire les joints et recouvrir l'ouvrage et 0m.03 pour compléter l'épaisseur de la forme et tenir lieu de la longueur de queue qui manque aux pavés.

Pour faire ces travaux, les matériaux sont approvisionnés d'avance. A Paris les pavés neufs sont reçus dans les dépôts à ce destinés, et on va y prendre chaque jour ceux dont on a besoin. Dans la campagne, les réceptions se font sur les accotements mêmes de la route où les matériaux, sables et

pavés sont approvisionnés.

La quantité de sable est calculée d'avance d'après les bases qui précèdent, le nombre des pavés qui seront nécessaires est évalué d'après les expériences que l'on a faites précédemment dans des circonstances analogues. On sait qu'à Paris il faut généralement 1/8 de pavés neufs; lorsque le grès est plus dur il ne faut que 1/10

A Paris, les rues très fréquentées sont relevées à bout à peu près de 5 ou 6 ans. Quelques unes construites en mauvais pavés ou sur un sol argileux, de 3 en 3 ans. D'autres peu passagères, ne se relèvent pas une fois en 20 ans.

On doit, autant que possible proportionner la quantité de pavés neufs à la fréquentation de la chaussée et établir les proportions de manière à conserver toujours à la chaussée la même épaisseur, sans cela le capital de la route diminuerait chaque année et l'on finirait par arriver à un moment où il faudrait pour ainsi dire la refaire à neuf. C'est ce qui est arrivé à Paris, après la Révolution, sur la route de Paris à Lille par Péronne en 1812, 13 et 14 quand Anvers appartenait à la France.

Entretien simple. L'entretien simple consiste à remplacer les pavés cassés et à relever les flaches, c'est à dire les parties du pavé qui sont enfoncées ou usées. Dans quelques localités, ce travail se fait par des ateliers de paveurs payés directement par l'Administration, c'est ce qui se fait à Paris et dans beaucoup d'autres localités. Lorsque le travail est fait par un entrepreneur, on mesure l'étendue de chaque flache, ou plutôt on compte le nombre des pavés arrachés, et par un tableau fait d'avance et convenu une fois pour toutes, on en conclut la surface. Il faut pour ce travail quelques pavés neufs pour remplacer ceux qui sont cassés ou usés, et 0m.08 de sable environ par mètre carré. L'exécution du repiquage exige les

mêmes soins que celle des relevés à bout, tant pour le piochage de la forme que pour la disposition des pavés. C'est-à-dire qu'il convient de vider la forme, et de raffermir le fond du trou, avant de replacer le sable vieux et le sable frais nécessaire pour reposer le pavé ou les pavés dans leurs alvéoles à la hauteur des pavés environnants. Moins on peut piocher la forme, mieux cela vaut.

Comme les pavés neufs ont des dimensions plus fortes que les pavés des chaussées à repiquer et que leur emploi dans les repiquages forcerait à les tailler, on préfère généralement employer la totalité des pavés neufs à faire les relevés à bout et faire servir les pavés vieux provenant des chaussées ainsi démontées à exécuter les repiquages.

Chaussées en empierrements. — Jusqu'à ces dernières années l'entretien des chaussées en empierrement se faisait sans principes fixes et ceux qui étaient généralement admis étaient vicieux. Mais, depuis la Révolution de Juillet, l'attention des Ingénieurs les plus habiles s'est portée sur cet objet essentiel à la prospérité publique et maintenant les principales bases de l'art d'entretenir les routes sont unanimement adoptées en France.

Ce que l'on doit se proposer dans l'entretien d'une chaussée en empierrement formée de petits matériaux enchassés les uns dans les autres, c'est de lui conserver une surface unie, résistante et une épaisseur constante. Les moyens à employer pour atteindre ce but consistent à empêcher l'eau de séjourner sur la chaussée, et à prévenir les flâches et les ornières.

Ce double but ne peut être atteint que par un travail de tous les instants. Ainsi, il faut que des ouvriers soient constamment occupés, surtout dans les moments de pluie et de dégel, à faire écouler l'eau, à enlever la boue

ou la poussière à mesure qu'elles se produisent et à remplir les ornières dès qu'elles commencent à se former.

D'ès lors il faut avoir constamment sur la route

1° Des ouvriers en nombre suffisant pour exécuter les travaux que nous venons d'indiquer, dès qu'ils deviennent nécessaires.

2° Des matériaux tout préparés pour être mis en œuvre et remplacer ceux qui sont usés.

On conçoit que le travail à faire n'est pas toujours aussi considérable, qu'il y a plus à faire par la pluie que par le beau temps, à la suite des dégels que quand les chaussées sont raffermies par la sécheresse ou la gelée ; que dès lors le nombre des ouvriers ne peut pas être le même ou que s'ils restent sur la route il faut que l'on ait à leur donner une occupation autre que celle de l'entretien de la surface de la chaussée. Les occupations que l'on peut leur donner consistent soit à entretenir la pente régulière des accotements, soit à casser les pierres qui doivent être employées à l'entretien. Il y a quelques localités où l'on peut trouver ainsi à occuper toute l'année le nombre d'ouvriers dont on a besoin pendant les plus mauvais temps. Ces ouvriers portent le nom de cantonniers parcequ'ils sont chargés de l'entretien d'une portion de route que l'on nomme leur canton et sur lequel ils travaillent exclusivement.

Le plus généralement, il est impossible d'occuper constamment le nombre d'ouvriers nécessaires dans les mauvais jours, alors on a des cantonniers chargés de l'entretien d'un canton, et quand ils ne suffisent pas à l'exécution des travaux qui sont devenus nécessaires, on leur adjoint d'autres ouvriers que l'on nomme auxiliaires.

D'après ce que nous venons de dire, on voit que l'entretien se fait à peu près sur toute la longueur d'une

mêmes soins que celle des relevés à bout, tant pour le piochage de la forme que pour la disposition des pavés. C'est-à-dire qu'il convient de vider la forme et de raffermir le fond du trou, avant de replacer le sable vieux et le sable frais nécessaire pour reposer le pavé ou les pavés dans leurs alvéoles à la hauteur des pavés environnants. Moins on peut piocher la forme, mieux cela vaut.

Comme les pavés neufs ont des dimensions plus fortes que les pavés des chaussées à repiquer et que leur emploi dans les repiquages forcerait à les tailler, on préfère généralement employer la totalité des pavés neufs à faire les relevés à bout et faire servir les pavés vieux provenant des chaussées ainsi démontées à exécuter les repiquages.

Chaussées en empierrement. — Jusqu'à ces dernières années l'entretien des chaussées en empierrement se faisait sans principes fixes et ceux qui étaient généralement admis étaient vicieux. Mais, depuis la Révolution de Juillet, l'attention des Ingénieurs les plus habiles s'est portée sur cet objet essentiel à la prospérité publique et maintenant les principales bases de l'art d'entretenir les routes sont unanimement adoptées en France.

Ce que l'on doit se proposer dans l'entretien d'une chaussée en empierrement formé de petits matériaux enchassés les uns dans les autres, c'est de lui conserver une surface unie, résistante et une épaisseur constante. Les moyens à employer pour atteindre ce but consistent à empêcher l'eau de séjourner sur la chaussée, et à prévenir les flaches et les ornières.

Ce double but ne peut être atteint que par un travail de tous les instants. Ainsi, il faut que des ouvriers soient constamment occupés, surtout dans les moments de pluie et de dégel, à faire écouler l'eau, à enlever la boue

ou la poussière à mesure qu'elles se produisent et à remplir les ornières dès qu'elles commencent à se former.

Dès lors il faut avoir constamment sur la route

1°. Des ouvriers en nombre suffisant pour exécuter les travaux que nous venons d'indiquer, dès qu'ils deviennent nécessaires.

2°. Des matériaux tout préparés pour être mis en œuvre et remplacer ceux qui sont usés.

On conçoit que le travail à faire n'est pas toujours aussi considérable, qu'il y a plus à faire par la pluie que par le beau temps, à la suite des dégels que quand les chaussées sont raffermies par la sécheresse ou la gelée; que dès lors le nombre des ouvriers ne peut pas être le même ou que s'ils restent sur la route il faut que l'on ait à leur donner une occupation autre que celle de l'entretien de la surface de la chaussée. Les occupations que l'on peut leur donner consistent soit à entretenir la pente régulière des accotements, soit à casser les pierres qui doivent être employées à l'entretien. Il y a quelques localités où l'on peut trouver ainsi à occuper toute l'année le nombre d'ouvriers dont on a besoin pendant les plus mauvais temps. Ces ouvriers portent le nom de cantonniers parcequ'ils sont chargés de l'entretien d'une portion de route que l'on nomme leur canton et sur lequel ils travaillent exclusivement.

Le plus généralement il est impossible d'occuper constamment le nombre d'ouvriers nécessaires dans les mauvais jours, alors on a des cantonniers chargés de l'entretien d'un canton, et quand ils ne suffisent pas à l'exécution des travaux qui sont devenus nécessaires, on leur adjoint d'autres ouvriers que l'on nomme auxiliaires.

D'après ce que nous venons de dire, on voit que l'entretien se fait à peu près sur toute la longueur d'une

route et que les ouvriers cantonniers ou auxiliaires sont répandus sur cette route à des distances plus ou moins éloignées suivant la fréquentation, la qualité des matériaux, la nature du sol. Si l'on n'avait pas des moyens de surveillance bien organisés, il arriverait souvent que ces ouvriers seraient oisifs et que l'on aurait une mauvaise route en dépensant beaucoup. Pour prévenir cet inconvénient, on charge un cantonnier sur trois de surveiller ses voisins, et on choisit pour cela le plus habile, afin que non-seulement il surveille, mais qu'il puisse donner des conseils. Comme une partie de son temps est employée à visiter les cantons voisins, son canton est moins étendu que s'il travaillait constamment; on lui donne le nom de Cantonnier chef, son salaire est plus élevé que celui des cantonniers ordinaires.

Pour mettre de l'harmonie dans le mode d'entretien adopté sur une route, on emploie en outre des cantonniers ambulants qui n'ont pas de canton, mais qui sont chargés de la surveillance de plusieurs cantons qu'ils parcourent constamment et sur lesquels ils donnent des conseils et des exemples aux cantonniers ordinaires qui en ont besoin.

Tous ces agents sont de plus surveillés par les piqueurs, les conducteurs et les Ingénieurs, mais à des époques plus ou moins éloignées. Pour cette surveillance on emploie avec succès de petites lunettes au moyen desquelles le surveillant voit sans être vu. Les peines, lorsque les cantonniers ne sont pas sur leurs cantons, lorsqu'ils sont trouvés oisifs, causant avec les passants, consistent en retenues sur les salaires, retenues graduées suivant la gravité des cas.

Afin d'assurer à la fois le service des cantonniers et celui des agents chargés de les surveiller, les cantonniers sont tenus d'avoir un livret sur lequel ils inscrivent chaque soir le détail du travail qu'ils ont fait dans la journée. Les surveillants sont tenus de viser

ces livrets et d'indiquer la date et l'heure de leur visite.

Les cantonniers sont en outre tenus d'indiquer le point de la route où ils travaillent, en plantant sur l'arête du fossé, un voyant formé d'une tige en fer surmontée d'une plaque en tôle portant le N.° du canton.

Les outils dont se sert un cantonnier sont : la pelle, la brouette, le racloir en tôle, la houe ou la tournée, un cordeau de 20.m avec deux fiches, une masse à casser les pierres ou les cailloux, un balai de bouleau très flexible et un pilon. A Paris on ajoute à ces outils une brosse balai exécutée avec un roseau d'Amérique très élastique et résistant.

Le moment le plus favorable pour l'emploi des matériaux est un temps humide qui permet d'enlever facilement les détritus et la boue, et qui en amollissant un peu la surface de la chaussée facilite sa liaison avec les pierrailles rapportées.

Si on se bornait à déposer et à étaler les matériaux neufs sur les anciens, il arriverait souvent que la liaison se ferait mal. Pour faciliter la prise et enraciner les matériaux neufs dans la chaussée, on pioche les bords de la flâche qui doit être rechargée afin de donner de l'épaisseur au rechargement dans son pourtour, et on enlève les matériaux et les détritus, puis quand les matériaux neufs ont été répandus sur la place ainsi préparée et arrosée quand on le peut, on les recouvre des matériaux et des détritus fournis par le piochage et on les comprime avec le pilon. La pluie est très favorable à ce travail.

Les pièces ainsi mises doivent être de peu d'étendue et disposées de manière que les charretiers ne puissent pas en détourner leurs voitures. Elles doivent être soignées pour maintenir les matériaux en place, et on en accélère la prise avec le pilon.

L'époque des dégels est la plus défavorable à l'entretien des routes, c'est alors qu'il faut surtout une grande activité pour-

empêcher les ornières de se former. Ces dégradations sont particulièrement à craindre sur les chaussées qui contiennent beaucoup de détritus et qui reposent sur un sol crayeux ou argileux; parceque l'eau qui y séjourne, écarte, en se congelant les matériaux dont la chaussée est composée et les désagrège, de sorte que lorsque la gelée cesse, il n'y a plus aucune liaison entre ces matériaux, et que ce n'est qu'avec des soins de tous les instants qu'on peut empêcher leur bouleversement. Dans les bons terrains mêmes l'introduction de la terre ou de la boue argileuse entre les pierres cassées a des inconvénients et c'est pour l'empêcher que l'on enlève la boue et la poussière. On diminue beaucoup l'influence fâcheuse des dégels en entretenant parfaitement lisse la surface des chaussées, avant et pendant les gelées. Le balai est alors d'un grand secours, il sert à enlever la poussière qui est alors formée de terre pulvérisée et de glace mêlées, et si l'on a eu soin de tenir la chaussée purgée de ces matières elle reste sèche au dégel et ne souffre pour ainsi dire pas.

Lorsqu'une route bien faite a été bien entretenue et qu'elle a peu de pente en travers, elle s'use à peu près parallèlement à sa surface, dès lors quand on y rapporte des matériaux pour remplacer ceux que le roulage a usés et conserver à la chaussée son épaisseur, on diminue au moins momentanément la beauté de la route. D'un autre coté les matériaux déposés sur une surface solide s'écrasent plus ou moins, et avant qu'ils soient pris, ils ont été en partie réduits en détritus.

Dans quelques départements, on laisse user les routes de 0.m 06 à 0.m 08 d'épaisseur en ne rapportant que le cube des matériaux strictement nécessaires pour maintenir l'uni de la surface, afin de faire un rechargement général que l'on comprime au rouleau au fur et à mesure de son exécution. De cette manière on n'impose pas cette charge au roulage, et surtout on conserve aux matériaux d'entretien toute leur grosseur.

Autrefois, au lieu de cet entretien de tous les instants que nous venons de décrire, on faisait à l'entrée de l'hiver ce que l'on appelait un répandage général, lequel consistait à répandre sur la chaussée la totalité ou la presque totalité des matériaux fournis dans l'année. Cette opération se faisait avec un atelier ambulant; une partie des ouvriers enlevait la boue, d'autres chargeaient la pierre dans des brouettes et la déposaient sur la chaussée; d'autres enfin la répandaient. Il résultait de là que les routes devenaient, à cette époque, aussi rudes à parcourir que des routes neuves, que le travail de l'hiver consistait à rabattre les bourrelets que soulevait le passage des roues des voitures, et que souvent, avant le retour de la belle saison, on n'avait plus de matériaux préparés pour réparer les ornières et les mauvais pas qui se formaient dans les points où la route avait le moins de résistance.

Ce système est maintenant proscrit d'une manière absolue, et la méthode rationnelle que nous avons décrite précédemment se répand de plus en plus. Lorsque ces principes seront bien compris et bien appliqués, que la surveillance des cantonniers sera fortement organisée, il est probable que toutes les routes de France pourront être également belles, quand on y consacrera les fonds nécessaires pour compenser l'usure des chaussées.

Un point essentiel est donc de constater rigoureusement l'usure des chaussées.

Dans ce but on a fait faire à des époques plus ou moins éloignées, cinq à six ans, des sondages dans les empierrements en ouvrant transversalement dans les chaussées des tranchées descendues jusques au sol sur lequel l'empierrement repose. Mais ces sondages ne peuvent pas donner des résultats certains, 1° Parcequ'ils sont faits par des ouvriers qui n'y attachent pas assez d'importance, et que d'ailleurs la forme

sur laquelle reposent les pierrailles peut n'avoir pas été horizontale. 2° parcequ'ils ne sont pas faits toujours au même point.

Pour arriver à un résultat qui ne puisse pas être contesté nous avons proposé de faire usage d'une règle très droite d'une longueur de 4m, munie de deux pieds adaptés à ses extrémités et d'un niveau de maçon pour la placer horizontalement. L'un des pieds est fixé à vis sur la règle et peut être ainsi haussé ou baissé de manière que l'on puisse amener la règle dans la position horizontale. Celle ci est percée de 0m.25 en 0m.25 par des fiches en fil de fer terminées du haut par un œil et renforcées du bas par une embase à vis; chaque tige peut être fixée dans sa position par une vis de serrage à tête plate.

On conçoit dès lors que si l'on a scellé dans l'accotement près de la chaussée un dé en pierre enterré de dix centimètres, on pourra, à un moment quelconque déterminer avec cette règle la forme et la position de la chaussée par rapport au dé ou repère et parconséquent mesurer l'usure de sa surface.

Construction des Ponts.

Introduction

Lorsqu'une voie de communication réunit deux parties du territoire séparées par une rivière, un ruisseau, ou même un simple ravin qui ne peut être traversé sans difficulté ou sans danger, il est nécessaire d'assurer le passage au moyen d'un ouvrage d'art auquel on donne le nom de pont, de ponceau ou de viaduc, et qui permet de continuer la route au dessus de l'obstacle naturel par lequel elle serait, sans cela, entravée ou interrompue.

Les Ponts sont construits en pierres, en bois ou en métal; ils ont deux ou plusieurs points d'appui.

On donne le nom de Ponceaux aux petits ponts qui n'ont que deux points d'appui distants de 4 mètres au plus entre deux culées.

Les Viaducs sont des ponts destinés à faire passer un chemin au dessus d'un autre chemin ou même d'un vallon dans le fond duquel on ne veut pas descendre.

On nomme Ponts-aqueducs ceux qui servent à faire passer un cours d'eau au dessous d'un chemin, d'un vallon ou d'une rivière et Pont-Canal celui sur lequel passe un canal de navigation.

On distingue les Ponts fixes, les Ponts mobiles, les Ponts volants; ils sont fixes quand ils sont construits à demeure et qu'ils offrent un passage continu, Mobiles, quand ils sont susceptibles d'être dérangés de leur position pour interrompre momentanément le passage, mais cependant en restant toujours dans une position déterminée, Volants, quand ils peuvent

être déplacés à volonté.

Les appuis extrêmes d'un pont portent le nom de culées, les appuis intermédiaires entre les culées portent celui de Piles quand ils sont en pierres, de Palées quand ils sont en bois ou en métal.

Les ouvertures portent le nom d'Arches ou d'Arceaux et de travées. Les arches et les arceaux sont en maçonnerie, les travées sont en bois ou en métal; les arceaux sont de petites arches.

Afin de procéder du petit au grand, nous commencerons par nous occuper des ponceaux.

Chapitre I.er

Ponceaux.

Les ponceaux sont, comme nous venons de le voir des ponts de peu d'importance qui se construisent le plus souvent sur des ruisseaux d'un volume très variable suivant les saisons, et quelquefois sur des ravins qui sont à sec une partie de l'année.

§. 1. Débouché.

On voit, d'après ce que nous venons de dire sur la position des ponceaux, que lorsqu'on a à étudier un ponceau, la première question à résoudre est celle qui a pour but la détermination de l'intervalle à laisser entre les culées, ou le débouché. Il importe de ne pas faire un ponceau trop étroit parceque, en cas de grandes eaux, il serait emporté, ou que, s'il résistait, l'eau s'élèverait du côté d'amont et que, si cette élévation était assez

considérable pour surmonter la route, celle-ci pourrait être emportée. Cela est surtout important lorsqu'il y a, à peu de distance en amont ou en aval, des lieux habités qui seraient exposés à souffrir de l'exhaussement des eaux ou des ravages qu'elles pourraient causer après la destruction de la route.

S'il existe d'autres ponceaux en amont ou en aval du point où se trouve celui que l'on projette, on les prend pour termes de comparaison, et en ayant égard à la quantité d'eau qui peut affluer en plus ou en moins, on détermine approximativement le débouché.

Quand il n'a pas encore été construit de ponceau sur le ruisseau ou le ravin que l'on a à franchir, il faut, si la pente du ruisseau, sa section, la hauteur de ses crues sont connues calculer la vitesse que l'eau doit prendre à l'époque de ses crues et par suite le volume qui est égal au produit de la section par la vitesse. Connaissant le volume, on fixera le débouché de manière que la vitesse de l'eau à son passage sous le pont ne soit pas excessive et ne puisse pas attaquer le fond.

Pour déterminer la vitesse d'un cours d'eau quand on en connait la section et la pente on se sert de la formule

$$RI = 0,0000242651\ V + 0,000365543\ V^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad [A]$$

dans laquelle I est la pente par mètre, V la vitesse moyenne de l'eau ou l'espace parcouru en une seconde, et R le rapport de la section au périmètre mouillé de cette section. Ainsi soit $acdefgb$ cette section, R, sera égal à cette surface divisée par la longueur du périmètre mouillé $a\,c\,d\,e\,f\,g\,b$. Pl X. fig 1

En résolvant l'équation [A] par rapport à V, on aura la vitesse moyenne que prendra l'eau dans le lit donné, puisque l'on connait R et I

On sent que pour calculer le volume par la méthode que nous venons d'indiquer, il faut que le lit du ruisseau soit régulier, car s'il était inégal ou sinueux la formule serait

inapplicable. Il faut également connaître la hauteur des eaux à l'époque des crues. Si on manque de ces éléments essentiels la méthode que nous venons d'indiquer ne peut être employée. Dans ce cas on suit quelquefois une règle empyrique qui paraît avoir été sanctionnée par l'expérience dans les pays où le sol est peu perméable.

D'après cette règle dans les pays plats, comme la Hollande, on donne 0m.45 à 0m.50 de largeur de débouché par 1000 hectares de terrain compris dans le bassin dont le pont doit assurer l'écoulement. Quand au contraire le sol a de la pente et quand les collines qui entourent le bassin s'élèvent à 50m. environ au dessus des points les plus bas, on donne 1m.25 par 1000 hectares. Enfin quand le bassin est resserré entre des montagnes dont la pente est rapide et qui sont très-élevées, il faut encore accroître le débouché, parceque les eaux coulant sur un sol plus incliné arrivent plus vite et plus abondamment au passage du pont.

Si on avait lieu de ne pas accorder de confiance à ce moyen d'établir le débouché d'un ponceau, on pourrait se rendre compte de la quantité d'eau que le bassin fournirait pendant la pluie d'orage la plus abondante, en supposant cette pluie assez prolongée pour que le pont eût à débiter par seconde la quantité d'eau tombée dans l'étendue du bassin. Pour déterminer cette quantité d'eau, il faut savoir que, d'après les observations les plus exactes, le volume moyen d'eau tombée en une seconde pendant une pluie continue très abondante est de 0mc.000002 par mètre carré. J'ai fait en 1843 des observations qui m'ont donné 0mc.000066 pour la quantité d'eau fournie par seconde pendant une pluie très abondante, mais qui n'était pas un orage. Un orage excessivement violent m'a donné dans le moment de sa plus grande pluie qui a duré deux minutes un produit par seconde de 0m.0000342.

Il résulte des observations faites pendant un grand nombre d'années que la plus longue durée d'une pluie fournissant par seconde une tranche d'eau de 0,0000013 n'excède pas 17h. ou 61200 secondes. Dès lors il est évident que l'application de cette méthode de calculer le volume d'eau à débiter par un pont ne peut se faire que dans le cas où le bassin serait assez petit pour que la première eau venue de l'extrémité fût arrivée au pont avant la cessation de la pluie.

Dans un grand bassin, dans celui surtout qui serait très allongé, il n'y aurait qu'une pluie continue qui pourrait durer assez longtemps, pour que l'eau venue du point le plus éloigné du pont fût arrivée avant que la pluie eût cessé. Mais comme ces pluies très-prolongées sont peu abondantes, elles ne peuvent servir de base pour établir le débouché des ponceaux.

Dans un très petit bassin il peut arriver que le ponceau ait à débiter par seconde la quantité d'eau fournie par un orage ou une trombe d'eau, sur le bassin, dans ce même temps, diminuée du volume absorbé par le sol.

J'ai trouvé, en consultant les registres de l'observatoire de Paris, que l'orage le plus abondant parmi ceux observés avait fourni par mètre carré 0m.c 0189 en 30 minutes. Ce qui fait par seconde et par mètre carré 0m.c 0000105, ces pluies abondantes ne durent pas beaucoup plus que celle là.

Le cas le plus défavorable, c'est à dire celui dans lequel le volume des eaux de pluie à débiter par un ponceau est le plus abondant, se présente, soit lorsque le sol étant gelé et recouvert de neige, il survient une pluie chaude, soit lorsque le sol est rendu imperméable par des pavages ou par des bâtiments et qu'il survient une pluie de la plus grande abondance. Sur un sol naturel il peut y avoir imbibition plus ou moins considérable suivant la formation géologique du terrain supérieur : sur les argiles et les marnes argileuses, les granits et autres roches peu feuilletées

l'absorption est à peu près en moyenne de 0.43 pour 1.

Dans les terrains crayeux ou d'autres roches également feuilletées, la pluie est presque entièrement absorbée.

Lorsque le sol est recouvert de terre végétale sur une très forte épaisseur, on admet d'après d'assez nombreuses expériences que l'eau coulant à la surface est en moyenne les 3/7 de l'eau de pluie.

Quand on a calculé approximativement le volume d'eau maximum à écouler par seconde, on se rend compte par la formule précédente [A] de la hauteur à laquelle les eaux s'élèveront dans le ravin. Pour cela on observe que le volume débité par seconde et que nous représenterons par Q est égal à la section d'écoulement multipliée par la vitesse. Appelons cette section ω et son périmètre mouillé χ, nous aurons $Q = \omega V$ et $R = \frac{\omega}{\chi}$, substituant dans la formule [A] nous aurons

$$\frac{\omega}{\chi} I = 0{,}0000242651 \frac{Q}{\omega} + 0.000365543 \frac{Q^2}{\omega^2} \ldots\ldots\ldots [B]$$

Connaissant la forme du ravin on obtiendra en fonction de la profondeur de l'eau prise comme inconnue, la section ω et le périmètre mouillé χ. Ainsi soit une forme trapézoïde avec une largeur au fond l et des talus tels que leur base soit $\frac{n}{m}$ de la hauteur que nous appellerons x, nous en conclurons.

$$\omega = x\left(l + \frac{n}{m}x\right) \text{ et } \chi = l + 2\sqrt{x^2 + \frac{n^2}{m^2}x^2} = l + 2x\sqrt{1 + \frac{n^2}{m^2}}$$

substituant dans [B] nous arriverons à une équation du 6e degré en x dans laquelle a et b remplacent les coefficients numériques

$$Ix^3\left(l + \frac{n}{m}x^3\right) = aQ\left(l + 2x\sqrt{1 + \frac{n^2}{m^2}}\right)\left(l + \frac{n}{m}x\right)x + bQ^2 x\sqrt{1 + \frac{n^2}{m^2}}$$

en faisant $0.0000242651 = a$ et $0.000365543 = b$

Dans chaque cas particulier, après avoir remplacé les lettres par leurs valeurs numériques, on substitue à la place de x les valeurs 1, 2, 3, entre lesquelles on peut présumer que se trouve la valeur réelle. Quand on a ainsi obtenu le nombre entier de cette valeur on arrive

par d'autres substitutions à une valeur de plus en plus rapprochée.

Si l'on recule devant ces calculs on pourra, connaissant le volume à écouler par seconde, faire diverses hypothèses sur la profondeur de l'eau et chercher par la formule [B] les valeurs de Q correspondantes. On arrivera bientôt par tatonnement à la valeur x qui satisfera aux conditions du problème.

Cela fait, on déterminera la largeur du débouché de manière que la vitesse sous le pont ne dépasse pas celle à laquelle peuvent résister les berges du ruisseau. Soit V cette vitesse et y la largeur du débouché, x étant la hauteur de l'eau connue dans le ruisseau, hauteur que nous avons déterminée plus haut, on doit avoir $V.x.y = Q$, de là on tire la valeur de y puisque x a été déterminé antérieurement.

Supposons que par l'un quelconque des moyens que nous avons indiqués les dimensions d'un ponceau aient été déterminées; il reste à arrêter sa forme et sa construction.

§.2. Ponceaux en Charpente.

Les ponceaux, à raison de l'exiguité de leurs proportions sont ordinairement construits en maçonnerie, quelquefois en bois, jamais en métal, à moins qu'on n'emploie des tuyaux.

Dans les ponceaux en bois le passage au dessus du cours d'eau ou du ravin se fait sur un plancher en charpente, supporté par des poutres. Mais comme les poutres ne peuvent pas reposer directement sur le sol qui n'offre pas assez de résistance (à moins qu'il ne soit en rocher) on les fait porter sur deux culées ou points d'appui résistants, plus ou moins avancés sur le talus du fossé. Ces culées peuvent se construire en charpente ou en maçonnerie, mais comme les bois ainsi enfoncés dans la terre pourrissent très promptement, on ne fait les culées des ponceaux en charpente que dans les localités où le bois est à très bas prix et la maçonnerie très chère. Dans ce cas les culées

sont formées d'un rang de Pieux ou morceaux de bois verticaux enfoncés dans le sol et couronnés à leur partie supérieure par un chapeau placé à la hauteur nécessaire pour recevoir les poutres.

Lorsqu'on construit les culées en maçonnerie, on les rapproche davantage et les murs qui les forment s'élèvent verticalement depuis le fond du ruisseau jusqu'aux poutres, de sorte que les culées font saillie sur les talus, on est alors obligé aux deux extrémités du pont, de construire des murs pour soutenir les terres rapportées derrière les culées (voir les fig. 4.5 et 6. Pl. X). On verra dans le § suivant comment ces murs se construisent.

§.3. Ponceaux en Maçonnerie

Les ponceaux en maçonnerie ont comme ceux en charpente, deux culées, mais elles sont moins hautes et on les rattache l'une à l'autre par une maçonnerie disposée en voûte, c'est-à-dire plus élevée au milieu que près des culées et qui passe au dessus du ruisseau, comme le tablier en charpente, pour livrer un libre écoulement aux eaux. La forme de la voûte est ordinairement un demi cercle tangent aux culées ou <u>Piédroits</u>. Le point de tangence porte le nom de <u>naissance</u>, parceque c'est là que naît la voûte. On fait quelquefois des voûtes de ponceaux en arc de cercle, quand les eaux du ruisseau s'élèvent beaucoup et que l'on ne peut exhausser la route à une hauteur suffisante pour adopter la forme du plein cintre.

La voûte se termine à ses extrémités par des plans verticaux que l'on nomme plans des têtes, mais pour soutenir les terres de la route qui passe sur le pont, il faut qu'à la voûte se rattachent des murs de soutènement. La disposition de ces murs n'est pas toujours la même, plusieurs formes sont en usage et l'on préfère l'une à l'autre suivant les localités, plus souvent suivant le goût ou le caprice du constructeur

1° Ponceaux, avec un mur en retour d'équerre.

La disposition la plus simple des murs à raccorder les têtes d'un ponceau avec les talus de la route, est celle qui consiste à construire ces murs de soutènement dans le prolongement des têtes elles mêmes, et à élever ces murs à la hauteur de la route. Prenons pour exemple le ponceau dont la coupe est indiquée Pl. X, fig. 4. Pour arrêter cette coupe dans les cas ordinaires quand la largeur du débouché est déterminée, on place l'intrados à une hauteur telle qu'il y ait entre l'intrados et le dessus de la chaussée une hauteur au moins égale à la somme des épaisseurs réunies de la voûte et de la chaussée. La première de ces épaisseurs dépend de la largeur de la voûte, la seconde est ordinairement de 0m.40. Nous avons dit que cette hauteur devait être au moins égale à ces hauteurs réunies, parceque il arrive quelquefois qu'un ponceau de faible largeur doit être placé dans le fond d'un vallon où la route est établie sous des remblais très élevés. Dans ce cas on place les naissances de la voûte à la hauteur des plus hautes eaux. On ne les élève plus haut que quand on a pour cela des motifs particuliers; par exemple pour faire servir le pont à la circulation dans les moments où il n'y coule pas d'eau.

Nous admettons pour l'exemple que nous voulons prendre que la voûte s'élève jusqu'à 0m40 au dessous de la chaussée, et que l'épaisseur de la voûte a été déterminée. Le plan de la tête se place ordinairement dans l'alignement des arêtes extérieures de la route. Cependant lorsque le ponceau a 3m au plus d'ouverture, et que la route est large, il peut arriver qu'il y ait avantage pécuniaire à faire le pont plus court d'une tête à l'autre que la route n'est large. Il faut, dans ce cas, pour éviter les accidents exécuter des ouvrages accessoires. Mais en général ces ouvrages sont hors de proportion avec l'importance d'un ponceau et nous admettons que les ponceaux ont toujours une longueur égale à la largeur

de la route sur laquelle ils sont construits.

La longueur des murs en retour construits dans le prolon-gement des têtes doit être telle que l'extrémité du mur s'étende au delà du sommet du cône par lequel le remblai de la route se raccorde avec la maçonnerie, afin qu'un léger éboulement ne mette pas à dé-couvert l'extrémité du mur. Le prolongement de ce mur au delà du sommet du cône doit pour cela être de 0m25 au moins, excepté,

dans le cas où les quarts de cône sont revêtus en pierre et sont par là mis à l'abri des éboulements.

Si on réduit le débouché du pont de manière que l'on puisse craindre l'affouillement du sol par l'effet de l'accroissement de vitesse qui en résultera, on est obligé de réunir les culées par une maçonnerie à laquelle on donne le nom de radier. (Voir Pl. X et XI.)

Le radier est quelquefois disposé en voûte renversée et se compose de deux assises au moins, l'une formant fondation, l'autre parement; la première est ordinairement en béton. Le parement doit avoir ses assises perpendiculaires au cours d'eau, et se terminer aux extrémités par une partie en arc de cercle disposée en voûte dans le plan horizontal.

Quant à l'enfoncement des culées dans le sol, c'est à dire à la fondation de l'ouvrage, nous n'en parlerons pas ici; il en sera question à l'occasion de la fondation des grands ponts. Nous dirons seulement qu'en général l'assise inférieure des culées fait saillie sur les autres et forme ainsi ce que l'on nomme le socle.

La voute a plus ou moins d'épaisseur suivant la largeur du ponceau, suivant la nature des matériaux employés à sa construction, suivant la charge qu'elle doit supporter. Nous traiterons de ces questions lorsque nous nous occuperons des grands ponts.

La forme extérieure de la voûte ou son extrados se dispose, soit suivant un cercle concentrique à l'intrados, soit suivant deux plans inclinés en sens opposés raccordés au sommet

par un arc de cercle. La première forme doit être préférée pour tous les ponceaux de 2m et au dessous.

Quand on a arrêté les formes extérieures d'un ponceau, il reste à déterminer le mode de construction, et en particulier celui de la voûte qui doit être formée d'un nombre plus ou moins considérable de pierres auxquelles on donne le nom de voussoirs. La division des voussoirs se fait suivant les lignes de plus grande et de plus petite courbure, afin que les surfaces de contact entre deux voussoirs consécutifs soient des plans. Dans cette division on place un voussoir au sommet de la voute dont il forme la clef; les autres commencent au niveau des naissances et sont symétriquement espacés dans chaque moitié de la voûte. On est dans l'usage de construire en pierres de taille les voussoirs des têtes, et en pierres de petit appareil, ou moëllons plus ou moins taillés, le surplus des paremens de la voûte ou des têtes. Dans tous les cas une assise en pierre de taille de fort échantillon est nécessaire pour couronner le ponceau et les murs en retour, d'abord pour élever la maçonnerie à la hauteur de la voûte, ensuite pour empêcher la destruction de la maçonnerie inférieure. Quelquefois sur cette assise que l'on nomme plinthe ou bandeau, on en place une ou deux autres qui s'élèvent au dessus de la route et forment un parapet. Mais en général les parapets ne s'appliquent qu'aux ponts construits sur cours d'eau importants et partout où il y aurait danger à ne pas clore le pont au dessus de ses têtes c'est à dire dans les lieux habités.

Il y a deux moyens d'appareiller les voussoirs des têtes pour les raccorder avec le surplus des paremens. Dans l'un, on limite tous les voussoirs à un cercle concentrique à la voûte, mais ce moyen ne peut être employé quand la plinthe repose immédiatement sur l'extrados des voussoirs, parceque l'on aurait entre les voussoirs et la plinthe des pierres taillées en coin et très petites, qui

par conséquent, ne présenteraient aucune solidité.

Dans l'autre système, représenté Pl. IX, les plans de joint des voussoirs se prolongent jusqu'à la rencontre des assises horizontales de la maçonnerie des murs et là se terminent par un plan vertical. Par ce moyen les voussoirs seuls sont taillés d'une manière particulière et il y a parfaite liaison entre la voûte et les murs. On raccorde les assises de petits matériaux avec celles des têtes de manière qu'un nombre entier d'assises de ces petits matériaux corresponde sans ressaut avec les plans supérieurs qui terminent les voussoirs. Les petits matériaux de la voûte se raccordent de la même manière avec les voussoirs des têtes, leurs assises suivent les génératrices du cylindre.

2°. Ponceaux avec murs en aile.

Dans quelques circonstances on est conduit par différentes considérations à ne pas raccorder par des murs en retour, les têtes d'un ponceau aux talus de la route et aux berges du ruisseau sur lequel il est placé. Alors on soutient les talus de la route par des murs qui, partant des culées, vont en s'évasant et portent pour cette raison le nom de murs en aile.

Lorsque le ponceau est établi dans un vallon, où les eaux coulent sans se creuser de lit, les murs en aile peuvent avoir un évasement arbitraire; on les fixe ordinairement à 22°½.

Quand au contraire le ponceau franchit un ruisseau dont le lit est encaissé dans des berges, si ces berges n'ont pas une inclinaison trop grande, on dispose l'évasement de manière que l'extrémité du mur se trouve à la rencontre de l'arête saillante du fossé et de l'arête creuse formée par l'intersection de la route et du plan du terrain naturel.

On ne se borne pas à évaser les murs en aile dans le sens horizontal ou en plan, on les évase dans le sens vertical en leur

donnant un fruit de 1/10. Le premier évasement a pour but de diminuer la contraction à l'entrée de l'eau sous le pont, le second donne plus de stabilité aux murs et plus de grâce à la construction.

Soit Pl XI fig 1, le plan du ponceau, dont l'ouverture et la longueur ont été déterminées comme nous l'avons vu, et fig 3, sa coupe; soit a^v, d^v fig 2 le talus du ruisseau se terminant au plan horizontal de la vallée passant en $\underline{a}^v$; soit $l^v_1 a^v_1$ fig. 4 le talus de la route se terminant au même plan horizontal.

La première opération à faire est de déterminer les traces du mur en aile sur le plan horizontal formé par le fond du ruisseau lorsqu'il est plan et que les culées sont sans socle ou saillie inférieure, ou passant au dessus du socle en f^v, lorsque le Radier est disposé en voûte renversée comme dans le cas actuel. Pour cela on sait que la trace du mur doit passer au pied de l'angle de la culée en f et que le plan de ce mur ayant un fruit de 1/10, passe par le point $\underline{a}$. Si donc on imagine un cône dont le sommet soit en a et dont la génératrice soit inclinée de 1/10 de sa hauteur, la base de ce cône sur le plan horizontal aura pour rayon le 1/10 de la hauteur du point a^v au dessus de ce plan et si nous décrivons le cercle de cette base, la trace $b^h f^h$ du plan du mur devra être tangente à ce cercle. (Fig 1)

Ayant déterminé cette trace, si nous menons par le point $\underline{a}^h$ un plan vertical parallèle au plan de tête de la voûte, ce plan coupera le parement du mur suivant la droite $\underline{a^h b^h}$. (fig 1) et $a^v b^v$ (fig. 2) L'intersection du parement de ce même mur avec le plan des têtes sera nécessairement parallèle à la ligne $a^v b^v$, elle passe par le point f (fig. 2), ainsi en projection verticale, ce sera la droite $f^v l^v$; $\underline{l}^v$ étant sur l'arête extrême de la route.

Le mur en aile doit se terminer au plan du talus de la route, ainsi ce plan coupera le parement incliné au 1/10 suivant la ligne.

$l^v a^v$ (fig. 2), $l^h a^h$ fig 1, $l^v_1 a^v_1$ fig 4, $l^v_2 a^v_2$ fig. 5

On donne ordinairement aux pierres qui couronnent les murs en aile 0m.50 de largeur. Cette largeur est nécessaire pour assurer la stabilité de ces pierres. — Puisque le couronnement du mur est dans le plan du talus et la route, sa surface supérieure sera limitée à une seconde ligne parallèle à $l^h a^h$ fig 1, $l^v a^v$. fig. 2, 4. 5. Si cette surface se prolongeait jusqu'à la rencontre du plan vertical auquel se termine le mur, celui-ci n'aurait pas de grâce et, en même temps il manquerait de solidité. On est donc dans l'usage de renforcer la dernière pierre par laquelle il se termine. Ainsi imaginons que l'on ait tracé l'appareil de la tête du ponceau comme l'indique la figure 2; que l'on ait retourné dans les ailes les lits horizontaux de cet appareil, l'assise correspondant au second voussoir répondra à l'angle obtus formé par l'intersection du couronnement du mur en aile et du plan vertical $a^h b^h$. Au lieu de prolonger le couronnement jusqu'à ce plan, nous l'arrêterons au lit supérieur de l'assise et nous diminuerons l'inclinaison de manière à former une espèce de dez. Cette inclinaison est arbitraire; étant donnée sur l'un quelconque des plans de projection, il est facile de l'obtenir sur tous les autres.

Pour appareiller les pierres dont se compose le parement du mur en aile, on doit déterminer sur les plans de projection la direction des plans de joint qui séparent ces pierres. Ces plans doivent être verticaux et perpendiculaires aux arêtes vues des lits des pierres. Si donc du point l^h (fig 1.) on abaisse une perpendiculaire sur la trace $f^h b^h$ du plan du mur, on aura la trace de ce plan vertical, et son intersection avec le plan du mur se projettera suivant $l^h m^h$ sur le plan horizontal et suivant $l^v m^v$ sur la projection verticale (Fig. 1). Ainsi tous les joints seront parallèles à $l^v m^v$

Les lits des pierres qui forment le couronnement du mur n'aboutissent pas directement au plan du talus, parceque, s'il en était ainsi, les pierres se termineraient par des angles aigus qu'on ne conserverait pas facilement, lors de la pose. On coupe l'extrémité de chaque pierre et on forme dans l'assise inférieure une crossette cor-

correspondante. Ces crossettes sont dans des plans perpendiculaires au plan vertical passant par l'axe du pont. La trace de l'un de ces plans est indiqué par les lettres g,v r,v (Fig 4); son intersection, avec le parement du mur, est indiquée fig 2 et 5 par les mêmes lettres.

Lorsque les ponceaux sont placés sous des routes en pays de montagne et prennent les eaux du fossé d'amont pour les rejeter dans la vallée, la tête d'amont diffère totalement de la tête d'aval; on adopte alors une disposition analogue à celle indiquée (Pl XII. fig 1). Dans ce cas, le radier général est indispensable, parceque l'eau acquiert sous le pont une vitesse ordinairement très-grande. L'extrémité du radier doit être défendue par un arrière radier disposé en caniveau et prolongé jusqu'au pied des remblais de l'escarpement.

Avant de terminer ce que nous avons dit des ponceaux, nous devons appeler l'attention sur une circonstance qui se présente assez fréquemment dans l'exécution des chemins de fer. Lorsqu'un ponceau est placé à la partie inférieure d'un remblai très élevé et que les terres employées à le former proviennent d'un seul côté de la vallée à franchir, on a quelquefois poussé le remblai sur toute sa hauteur à la fois, sans se préoccuper du ponceau qui se trouve alors très-chargé d'un côté, quand il ne l'est pas de l'autre. — Il est alors soumis à un effort latéral qui tend à le déverser et qui souvent le renverse. Pour prévenir cet effet désastreux il faut d'avance recouvrir le ponceau de remblais faits préalablement avec beaucoup de soin et élevés de un ou deux mètres au dessus de la voûte.

Dans les mêmes circonstances il importe de fonder les ponceaux sur un terrain incompressible. Pour cela on détourne quelquefois le ruisseau pour placer le ponceau sur un sol incompressible au pied d'un des coteaux, au lieu de le laisser dans le milieu de la vallée où le sol est ordinairement formé d'alluvions.

Chapitre 2

Ponts en pierre.

§1. Considérations générales.

Si les peuples anciens nous ont laissé en Architecture des modèles à imiter, nous les avons bien surpassés dans l'art de construire les ponts. Il paraît que les Romains sont les premiers qui aient exécuté des ouvrages de ce genre, et depuis cette époque reculée jusqu'au siècle dernier il avait été fait peu de progrès dans cette branche de l'art de l'Ingénieur. C'est à partir du 18e siècle seulement que la construction des ponts a pris des développements remarquables et qu'elle est parvenue successivement au degré de perfection où nous la voyons aujourd'hui.

On a commencé d'abord par des arches très-petites, des formes les plus propres à donner de la solidité à des constructions dont la stabilité ne dépend que de l'art avec lequel elles sont exécutées. Ce n'est que d'essai en essai que l'on est arrivé à exécuter avec sécurité les ponts hardis et élégants au moyen desquels on franchit actuellement les plus grands fleuves.

Ainsi, après avoir fait, comme les Romains, des ponts en plein cintre, ou en demi cercle, on en est venu à une époque de décadence, à employer les voûtes en ogives. Plus tard on a repris les pleins cintres, parceque les ogives offraient une excessive élévation par rapport

à la largeur des arches ; enfin on a employé la forme elliptique et l'arc de cercle, pour le cas où l'on avait besoin de grandes ouvertures et où cependant on ne pouvait élever les abords.

Ces différentes formes, l'ogive exceptée, sont encore usitées. Le choix que l'on en fait dépend, comme nous venons de le faire pressentir, des conditions particulières auxquelles le pont qu'on se propose d'exécuter doit satisfaire. C'est dans l'appréciation judicieuse de ces conditions et dans la détermination des ouvrages destinés à y satisfaire que consiste l'ensemble d'un projet de pont.

L'étude d'un projet de pont exige la solution de plusieurs questions importantes ; il faut déterminer : 1°. l'emplacement, 2° le débouché ; 3° la grandeur des arches, 4°. leur forme, 5°. les dimensions de toutes leurs parties ; 6° enfin le mode de construction.

Nous allons successivement développer les principes qui doivent guider dans ces études.

---

§.2. Emplacement.

L'emplacement d'un pont est quelquefois déterminé par la position des deux portions de routes, ou des deux rues qu'il doit mettre en communication. Cependant il peut se faire qu'une position ainsi déterminée, présente des inconvénients ; elle peut se trouver dans un coude de façon que les piles qui seraient bien placées par rapport à une des directions, seraient mal pour l'autre. Il peut se trouver que les rives soient trop basses, et que les rampes du pont forcent d'enterrer un grand nombre de maisons. il se peut enfin que le sol soit de très mauvaise qualité, tandis que l'on en trouverait un très bon à peu de distance. Ainsi donc, même dans le cas où la position du pont parait donnée, il convient encore d'examiner si un autre emplacement ne présente pas plus d'avantages que celui-là, soit sous le rapport de la commodité des abords, soit sous celui de la

facilité et de la solidité des fondations.

Il arrive souvent qu'on établit un pont pour remplacer un bac. On a dû choisir pour l'établissement de ce bac un emplacement où le lit de la rivière présentait un accès facile, c'est-à-dire des rives basses. C'est le contraire qu'on recherche pour établir un pont, parcequ'il faut, autant que possible, diminuer l'inclinaison et la longueur des rampes. Il y a lieu dans cette circonstance d'examiner s'il ne conviendrait pas de placer le pont dans une autre position, en modifiant la route aux abords.

Quelque soit l'emplacement que l'on adopte, il faut autant que possible éviter les ponts biais, surtout quand ils doivent avoir plusieurs arches, parceque l'appareil en est difficile et coûteux; et qu'ils présentent moins de solidité que les ponts droits.

Cependant il y a des cas où l'on ne peut pas les éviter. Cela arrive quand le pont doit relier deux rues qui ne se correspondent pas, quand il se trouve même en rase campagne, sur un long alignement droit.

Lorsque le pont doit ainsi être dirigé obliquement par rapport au lit de la rivière, on se trouve obligé de le faire biais parcequ'il faut qu'un pont ait ses points d'appui dirigés dans le sens du lit du cours d'eau, attendu qu'un pont pris en travers par un courant rapide est beaucoup plus exposé à être détruit par les affouillements qu'un pont sous lequel le cours de l'eau n'est pas contrarié.

D'un autre coté les canaux et les chemins de fer qui traversent des routes existantes conduisent assez fréquemment à construire des ponts biais. Par ce double motif nous devons nous en occuper.

La largeur des ponts dépend de l'importance de la route sur laquelle ils sont établis, et de leur position, soit dans l'intérieur d'une ville, soit dans la campagne.

Dans le premier cas, c'est-à-dire quand un pont joint deux parties d'une ville, sa largeur varie avec la population de

cette ville et avec sa fréquentation présumée. Et cependant il ne peut être rien établi à cet égard, quoique l'on puisse dire qu'en général, il doit avoir au moins la même largeur que les rues qui y aboutissent.

Dans la campagne la condition ordinaire à laquelle la largeur doit satisfaire, surtout si le pont a une certaine longueur, c'est que deux voitures puissent s'y croiser. Ce qui exige au moins 5m de chaussée. On donne ordinairement 7 à 8m d'une tête à l'autre afin d'avoir la possibilité de border la chaussée de trottoirs pour préserver les piétons des accidents.

§.3. Débouché.

Lorsqu'on établit un pont sur une rivière considérable dont le lit a, sur certains points, une grande largeur, la question de la détermination du débouché est de la plus haute importance. Si le pont est trop resserré, l'eau prend une grande vitesse en passant entre les points d'appui, elle attaque le fond, produit des affouillements, déracine les fondations, et amène la chute du pont. Quand au contraire on donne trop de largeur au pont, on fait une dépense inutile et quelquefois même nuisible, car il peut se former, sous une partie de sa longueur, des atterrissements qui se consolident pendant les étiages prolongés par la végétation rapide des plantes, au point de résister à l'action corrosive des crues survenant avant leur destruction résultant d'un séjour prolongé sous l'eau. De sorte qu'au moment d'une crue d'automne, le pont pourra être détruit, parceque le courant détourné par les atterrissements, aura pris une direction oblique et aura affouillé quelques-unes des piles. Cela est arrivé à Roanne et à Nevers; mais ce cas est plus rare que l'autre, ainsi il vaut mieux pécher par excès que par défaut.

Pour arriver à déterminer le débouché convenable, il faut.

1° Lever le plan de l'emplacement du pont et de ses abords, et l'étendre assez pour que le lit de la rivière soit indiqué avec exactitude à une distance de plusieurs centaines de mètres en amont et en aval.

2° Faire des profils en travers du lit de la rivière avec l'indication du niveau des plus basses et des plus hautes eaux. Ces profils doivent être rapportés à un même plan de comparaison, afin que l'on puisse connaître la pente de la surface de l'eau entre les divers profils.

3° Enfin mesurer la vitesse de l'eau à la surface à différentes époques de l'année, pendant l'étiage, pendant les plus grandes crues pendant les eaux moyennes.

La première de ces opérations se fait à l'aide de l'un quelconque des instruments dont nous avons fait connaître l'usage.

Pour lever les profils en travers, il faut d'abord indiquer leur emplacement par des jalons et même par des piquets, afin de pouvoir les rapporter sur le plan. Lorsque cette direction est arrêtée, on détermine à l'aide d'une chaîne métrique les positions relatives dans le sens horizontal, des différents points d'inflexion du sol au-dessus de l'eau, et avec un niveau leurs positions relatives dans le sens vertical. Pour déterminer la partie d'un profil qui est au-dessous de l'eau, on tend d'une rive à l'autre une corde en écorce de tilleul, ou un fil métallique sur lequel on a marqué des divisions avec des cordelettes, à chacune de ces divisions on mesure exactement la profondeur de l'eau, de sorte que le fond du lit est déterminé par rapport à la surface de cette eau et que l'on a le profil entier, si cette surface a été rapportée au plan de comparaison au moment du nivellement des berges.

La détermination de la vitesse à la surface n'est pas facile, c'est une opération délicate qui demande beaucoup de soin et d'attention. Pendant longtemps sur la foi des auteurs qui se sont occupés de cette question d'hydrodynamique et qui n'ont opéré que sur des canaux de

formes rectangulaires ou trapézoïdales, on s'est contenté de mesurer la vitesse à la surface d'un courant dans le milieu du lit. On a ainsi obtenu des résultats beaucoup trop forts. Quand Dubuat et après lui Mr de Prony ont cherché à déterminer la vitesse moyenne d'un cours d'eau dont on connaissait la vitesse à la surface, ils ne se sont donc servis que d'expériences faites sur des canaux artificiels en bois, très-peu étendus, fort profonds par rapport à leur largeur et dans lesquels les vitesses à la surface ne différaient pas beaucoup en allant du milieu vers les bords. Il n'en est pas de même dans un ruisseau de quelques mètres de largeur et à plus forte raison dans une rivière dont la largeur peut être cent fois plus grande que la profondeur et où la profondeur est très variable d'une rive à l'autre.

Alors la vitesse décroit d'une manière notable en partant du point le plus profond et elle devient presque nulle vers les bords dans les rivières dont les talus sont très allongées.

Dans tous les cas où la vitesse à la surface ne peut être considérée comme constante d'une rive à l'autre, pour avoir la vitesse moyenne à la surface il faut la mesurer à différents points pris à des distances égales et assez rapprochées pour suivre la loi de décroissement. La vitesse à la surface étant connue, on obtient la vitesse moyenne par la formule $v = \frac{V(V+2\ 37187)}{V+3,15312}$, dans laquelle v est la vitesse moyenne et V la vitesse à la surface

Lorsqu'on n'a pas besoin d'une grande précision on prend $v = 0.80\,V$.

Pour mesurer la vitesse à la surface, on se sert de flotteurs qui sont ordinairement des rondelles de liège qu'on leste avec des clous ou du plomb pour qu'elles affleurent la surface de l'eau et n'offrent pas de prise au vent. L'observation doit être faite dans une partie régulière et rectiligne du lit. Pour atténuer les erreurs résultant des causes accidentelles, on place en travers du courant, aux deux extrémités de la partie du lit que l'on a choisie pour l'expérience, deux cordeaux transversaux en corde de tilleul ou en fil de

fer, auxquels on a noué de petites cordes pour marquer les différents points correspondant aux filets du courant dont on veut mesurer la vitesse. Quand ces cordeaux sont tendus, un observateur placé sur une planche, quand il s'agit d'un ruisseau et sur la pointe d'un bateau quand c'est sur une rivière qu'on opère (*), lache un flotteur et indique par un cri convenu le moment de départ qu'il constate ou fait constater au moyen d'une montre à seconde; un autre observateur placé dans la direction du cordeau d'aval, annonce par un autre cri le moment où le flotteur passe sous le 2e cordeau; à cet instant le premier observateur lache un second flotteur dont on observe de même la marche, on répète cette opération cinq, six, dix fois et au moment où l'on cesse, on constate la durée de l'observation. Connaissant ainsi le temps, le nombre des flotteurs que l'on a lachés, la distance parcourue par chacun d'eux, on obtient la vitesse du filet d'eau observé, en divisant l'espace total parcouru par les nombre de secondes. En opérant ainsi sur un nombre suffisant de tranches longitudinales, on arrive à déterminer la vitesse réduite à la surface dans chacune de ces tranches et comme on peut en obtenir la section au moyen des profils en travers, on calcule facilement le volume.

On peut aussi mesurer la vitesse moyenne d'une rivière au moyen du moulinet de Woltmann, formé de 4 ailes disposées comme dans un moulin à vent et sur l'axe desquelles est adaptée une vis sans fin servant à mener un compteur décimal. Lorsque l'on a taré l'instrument en le faisant marcher avec des vitesses déterminées dans une eau dormante, et qu'on connait ainsi le rapport de la vitesse au nombre des tours des ailes, on peut, en descendant le moulinet à des profondeurs croissant à intervalles

---

(*) L'Observateur se place sur la pointe d'un bachot dirigé perpendiculairement au courant, afin que ce bachot n'ait aucune influence sur la marche du flotteur.

égaux de la surface de l'eau au fond, déterminer les différentes vitesses observées sur une même verticale et par suite la vitesse moyenne. On aura ainsi la vitesse moyenne de l'eau dans les diverses tranches considérées et par conséquent le volume.

Quand la rivière déborde dans le voisinage du pont, on doit chercher soit au-dessus, soit au-dessous du point où l'on a un pont à projeter, une partie du lit où les eaux restent encaissées à toutes les époques et y faire les opérations que nous venons de décrire, c'est-à-dire lever des profils en travers, avec l'indication du niveau des eaux aux époques où elles atteignent leurs limites extrêmes, et mesurer les vitesses à ces mêmes époques.

Quand on a ainsi obtenu les volumes maximum et minimum, sur ce point, on détermine approximativement le volume des eaux reçues par la rivière, dans l'intervalle compris entre l'emplacement du pont et le point où l'observation a été faite.

Il arrive souvent que l'on ne peut pas observer de crue, car elles n'ont lieu qu'à des intervalles ordinairement fort éloignés. Dans ce cas on n'a d'autre moyen que de se servir de la formule de M. de Prony que nous avons donnée en parlant des ponceaux. Ayant constaté la pente par mètre au moyen d'un nivellement très exact, et la section par un profil levé avec soin, on connait dans la formule $RI = av + bv^2$, les valeurs de R et I et on obtient celle de v en résolvant l'équation du second degré. On est même dispensé de ce calcul par les tables de M. de Prony qui donnent directement les valeurs de V lorsqu'on connait le produit RI du rapport moyen par la pente du cours d'eau à sa surface.

Dans les grands ponts, on ne peut pas, comme dans les ponceaux, diminuer le débouché jusqu'à accroître sensiblement la vitesse, parcequ'alors la construction d'un radier général exige une

dépense considérable.

Il faut donc calculer le débouché, pour qu'après la construction du pont il ne se produise pas une vitesse assez grande pour affouiller profondément le sol et déraciner les points d'appui du pont. Ainsi on a besoin de connaître la vitesse sous laquelle le terrain qui forme le fond du lit commence à être entraîné. Des expériences directes faites sur le sol même dont est formé le lit du cours d'eau sur lequel le pont doit être établi, seraient certainement le meilleur moyen pour déterminer cette vitesse. Mais ces expériences sont souvent impossibles à faire. Il est donc bon d'avoir des données sur la résistance des différents sols. Dubuat a fait sur ce sujet une série d'expériences dont voici les résultats :

Nature du sol.	Vitesses au delà desquelles le sol est entraîné	Nature du sol	Vitesses au delà desquelles le sol est entraîné
Terre brune détrempée	0m. 076	Pierres cassées, silex anguleux	1m. 22
Argile tendre	0m. 152	Cailloux agglomérés	1m. 52
Sable	0m. 305	Roches lamellaires	1m. 83
Gravier	0m. 609	Roches dures	3m. 00
Cailloux	0m. 614		

On ne doit pas négliger de se procurer, quand on le peut, des renseignements pour connaître, si cela est possible, la vitesse sous laquelle se produisent les affouillements et les déplacements du lit lorsqu'ils ont lieu. Quand on a ainsi reconnu à quelle vitesse on peut sans danger exposer le fond du lit, on calcule la section nécessaire pour débiter avec cette vitesse le volume des plus grandes crues. Divisant cette section par la profondeur du lit au-dessous du niveau de ces crues, on obtiendra la largeur du débouché, déduction faite des effets de la contraction. Mais

le plus souvent on serait conduit par cette méthode à donner aux ponts des largeurs excessives. On peut réduire le débouché très-notablement en défendant les fondations par des enrochements, par des enceintes de pieux et de palplanches au besoin par un radier général, lorsque le sol est indéfiniment affouillable, ou par des fondations descendant à un niveau inférieur aux affouillements les plus profonds.

Il arrive avec certaines formes de voûtes que le débouché ne croît pas comme la hauteur, cela a lieu quand les naissances de ces voûtes se trouvent au dessous du niveau des hautes eaux. Dans ce cas, il est nécessaire d'accroître la largeur entre les points d'appui de manière à avoir dans les plus hautes eaux la section calculée comme nous venons de le dire

Quand on a déterminé la largeur à donner entre les points d'appui, de manière à éviter l'affouillement des fondations, il reste encore à examiner la question importante de savoir si le remous produit par le rétrécissement de la section d'écoulement ne causera pas de dommage aux propriétés situées en amont de ce rétrécissement.

Il faut donc savoir calculer la hauteur du remous. Pour y parvenir soient :

L	la largeur du lit de la rivière	Avant l'exécution des travaux qui doivent rétrécir ce lit.
h	sa profondeur	
V	sa vitesse.	

La section du lit sera Lh, et le volume écoulé par seconde Q sera représenté par LhV

Si, par l'établissement d'un pont ou de tout autre ouvrage, ce débouché est réduit à n'avoir qu'une largeur l, l'eau s'exhaussera en amont de l'obstacle d'une quantité x et la vitesse deviendra V', la section sera $L(h+x)$ et le produit du cours d'eau ou le volume écoulé Q sera représenté par $L(h+x)V'$

Le volume restant le même, on aura :

$$L h V = L (h+x) V' \text{ d'où } V' = \frac{hV}{h+x}$$

Dans l'écoulement sous le pont la hauteur h reste sensiblement la même, et le volume ne peut trouver passage dans la section rétrécie que par l'effet d'un accroissement de vitesse qui se produit à l'origine du rétrécissement. Ainsi, dans l'écoulement au droit de l'obstacle, s'il n'y avait pas de contraction, nous aurions Q égal à $l h V_1$ en désignant par V_1 la vitesse dans l'étranglement; mais la construction produit le même effet qu'une diminution de section, et appelant m le coefficient de correction à appliquer, dans ce cas, nous avons $Q = l h m V_1$, nous avons $Q = L h V$ ainsi nous obtenons la relation

$$l h m V_1 = L h V \text{ d'où } V_1 = \frac{LV}{lm}$$

Si nous observons maintenant que le remous est donné par la différence entre les hauteurs dues aux vitesses V et V' nous aurons pour l'expression de ce remou que nous avons appelé x :

$$x = \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V'^2}{2g}$$

Mais $\frac{V_1^2}{2g} = \frac{V^2 L^2}{2g l^2 m^2}$, $\frac{V'^2}{2g} = \frac{V^2 h^2}{2g (h+x)^2}$

Donc, nous aurons.

$$x = \frac{V^2}{2g} \left(\frac{L^2}{l^2 m^2} - \frac{h^2}{(h+x)^2}\right) = 0{,}051 \; V^2 \left(\frac{L^2}{l^2 m^2} - \frac{h^2}{(h+x)^2}\right).$$

Cette équation est du troisième degré pour faire voir comment on peut la résoudre, nous l'appliquerons à un exemple pris sur le Weser et rapporté par Daubuisson dans son traité d'hydraulique

On avait trouvé avant l'établissement des piles d'un

pour

$L = 180^m 71$ largeur
$h = 5^m 57$ la profondeur } Avant l'établissement du pont.
$V = 1^m 494$ vitesse

Par l'établissement des piles, la largeur l a été réduite à $96^m 13$.

Le remous observé était $0^m.382 = x$.

En admettant pour le coefficient de construction $m = 0{,}90$ nous avons pour l'équation à résoudre

$$x = 0{,}051 \times \overline{1.494}^2 \left\{ \frac{\overline{180.71}^2}{\overline{0.90}^2} \times \frac{1}{\overline{96.13}^2} - \frac{\overline{5.37}^2}{(5.37+x)^2} \right\} \quad [B]$$

nous commencerons par supposer $x = 0$ dans le second terme du second membre et nous obtiendrons $x = 0^m.382$ substituant cette première valeur dans la même équation [B] on aura $x = 0^m.397$ différant de $\frac{1}{26}$ du remous observé

Si au lieu de prendre $0^m.90$ pour le coefficient de contraction tel qu'il est généralement admis, nous avions pris $m = 0{,}89$ nous serions arrivés à $x = 0.385$.

On peut conclure de cet exemple que la formule que nous avons donnée est parfaitement applicable.

Il n'est pas sans intérêt de connaître les variations que la pente de la Seine éprouve dans l'intérieur de Paris, suivant la hauteur de ses eaux, par suite des obstacles que les ponts opposent à leur libre écoulement.

Le tableau suivant résultant des observations faites vers 1840 par M. Poirée, inspecteur général des Ponts et Chaussées nous donne ces pentes.

Hauteurs.

Ordonnées du nivellement de Paris correspondantes aux hauteurs d'eau observées au pont de la Tournelle	Hauteurs de l'Eau au dessus de l'Étiage — Au pont de la Tournelle	Hauteurs de l'Eau au dessus de l'Étiage — Au Pont Royal	Pentes correspondantes aux différentes hauteurs.	Ordonnées du nivellement de Paris correspondantes aux hauteurs d'eau observées au Pont Royal.
	7^m.65	6^m.59	1^m.06	
	7.22	6.24	0,98	
	6.69	6.08	0,91	
	6.57	5.70	0,87	
70.98	5.55	4.70	0,85	71.81
71.76	4.75	4,10	0,85	72.41
72.24	4.27	3,40	0,87	73.11
72.74	3.77	2,82	0,95	73,69
73.24	3.27	2,23	1,04	74.28
73.74	2.77	1.65	1,12	74.86
74.24	2.27	1,08	1.19	75.43
74,34	2.17	0,90	1.27	75.61
74.99	1,52	0.20	1.32	76.31
75.24	1.27	0.00	1.27	76.51
	0,00 (0 de l'Échelle du Pont Royal)			

On voit que la pente est la plus grande au moment des basses eaux, et cela tient à l'influence qu'exercent, sur la grandeur

de la section les empattements des Ponts Notre Dame et au Change. A mesure que les eaux s'élèvent, la section s'accroît à peu près proportionnellement à la hauteur, et la pente diminue, jusqu'à ce que le niveau ait atteint 4m70 au pont Royal. A ce point, les eaux s'élèvent jusqu'aux reins des voûtes des ponts, et la largeur diminue progressivement. Par suite, la pente augmente et revient à 1m06 après s'être réduite au minimum à 0m83 et avoir été de 1m27 en étiage.

Il y a un cas où l'on peut n'avoir égard que jusqu'à un certain point aux effets du rétrécissement pour augmenter la vitesse; c'est quand le pont est construit sur le rocher ou quand on crée un rocher factice pour le recevoir, en construisant un radier général qui règne sur toute la longueur du pont, et s'étend plus ou moins loin en amont et en aval, alors on ne doit considérer le remous produit par l'étranglement que sous le rapport du dommage que le relèvement des eaux produirait sur les terrains de la vallée en les submergeant, et aussi à raison des affouillements qui se produiraient en aval du radier si la vitesse acquise sous le pont dépassait une certaine limite.

Nous reviendrons sur ce sujet quand nous nous occuperons de la fondation des ponts sur radier général.

§ 4. De la grandeur des Arches

Quand on a fixé l'emplacement et le débouché d'un pont, on doit s'occuper des dimensions et de la forme de l'arche ou des arches dont il sera formé.

Dans les opérations faites sur le terrain, on a dû relever avec soin les hauteurs respectives des crues et des basses eaux, le niveau auquel cesse la navigation, si la rivière est navigable, celui auquel ont lieu les débâcles et les inondations. Ces divers renseignements sont indispensables pour déterminer la forme du pont

Si le cours d'eau n'est pas navigable, s'il n'est exposé ni à des débâcles dangereuses, ni à des crues considérables, le pont qui n'a pas besoin d'être très-élevé, peut être composé de petites arches à moins que le sol ne soit de mauvaise qualité et que la fondation difficile et coûteuse des piles ne compense l'économie que présente la construction des petites voûtes sur celle des grandes.

Pour éclairer la question, il est nécessaire de faire l'estimation des travaux dans les diverses combinaisons qui ont été mises en avant, et ce n'est qu'après avoir établi ainsi l'ordre économique des projets que l'on fait un choix en toute connaissance de cause

A égalité de frais on doit préférer les arches les plus larges.

Quand la rivière, quoique non navigable, est sujette à de grandes crues ou à des débâcles, les petites arches ne peuvent plus convenir, parceque leurs points d'appui arrêtent les glaces et les corps flottants, et que s'ils sont rapprochés il en résulte des amas de glaces, dits embacles, qui sont une des causes les plus fréquentes de la destruction des ponts à petites arches. Dans ce cas on doit s'attacher à ne pas faire les arches plus étroites que celles qui existent en amont, afin que celles que l'on projette puissent livrer passage aux glaces qui ont franchi les ponts supérieurs.

Sur les rivières navigables, il faut donner aux arches une largeur d'autant plus considérable que la vitesse de l'eau est plus grande, afin d'éviter les accidents résultant du choc des bateaux contre les piles. Dans ce cas si le débouché est de moins de 25ᵐ on ne fait qu'une seule arche ; s'il est plus considérable, il faut en général plusieurs arches, parceque les grandes arches sont trop coûteuses, et on ne peut en faire moins de trois parcequ'il ne convient pas, sur une rivière navigable d'avoir une pile au milieu du courant, c'est-à-dire dans la direction que suivent ordinairement les bateaux.

Si cette division donnait un passage insuffisant pour la navigation, il faudrait faire l'arche du milieu plus large que les

deux autres. Sur une rivière navigable ayant peu de vitesse, on peut réduire la largeur des arches, et même en faire un nombre pair, si cette disposition offre des avantages capables de compenser les inconvénients qu'elle présente.

§.5 Forme des Arches.

On donne aux arches des ponts trois formes principales :

Le plein cintre formé par une demi circonférence dont les tangentes extrêmes sont verticales et tombent à l'aplomb des parements des piles ou des culées.

L'anse de panier est une courbe aplatie, dont la forme se rapproche de celle de l'ellipse. Elle est ordinairement composée d'une suite d'arcs de cercle tangents les uns aux autres et symétriquement placés par rapport à la ligne verticale passant par le milieu de l'arche. Les arcs extrêmes ont, comme dans le plein cintre, leurs tangentes extrêmes verticales.

L'arc de cercle, dont le centre est placé sur la perpendiculaire à la ligne qui joint les naissances. La différence de niveau entre le milieu de la ligne qui joint les naissances et le sommet de la voûte se nomme montée.

Différentes considérations doivent guider en général dans le choix de la forme du pont.

Si les abords du pont sont élevés et si l'on peut décrire le plein cintre sans que les grandes eaux surmontent les naissances au point de diminuer sensiblement le débouché ; c'est cette forme qu'il convient d'adopter, parcequ'elle est agréable à l'œil et qu'elle offre plus de solidité que les deux autres dispositions que nous avons indiquées. Quand on ne peut élever suffisamment les abords pour adopter le plein cintre, il faut essayer l'anse de panier qui n'est point aussi solide, mais qui, ayant une montée moindre que la demi largeur, permet, tout en offrant le même

débouché que le plein cintre, de donner au pont moins d'élévation qu'avec cette dernière forme.

Enfin, si la position du pont force à tenir ses abords le plus bas possible, il convient d'adopter l'arc de cercle

Dans tous les cas, il faut que l'arche principale, ordinairement celle du milieu puisse livrer passage aux bateaux jusqu'au moment où la navigation cesse; ainsi il faut connaître la hauteur maximum des bateaux chargés de marchandises encombrantes et donner une hauteur sous clef suffisante pour que ces bateaux puissent passer sous le pont à l'époque des plus grandes eaux navigables

Dans les ponts en arcs de cercle, les naissances doivent autant que possible être élevées au dessus du niveau auquel atteignent les débacles et même les crues, afin que les glaces ne viennent pas choquer contre les naissances de la voûte et que le débouché ne soit pas étranglé. Il est quelquefois impossible de satisfaire à cette dernière condition parceque pour accéder au pont, il faudrait établir des rampes trop longues qui, dans les villes, enterreraient les maisons voisines, et dans la campagne entraîneraient dans de trop forts remblais. Cela est plus difficile encore avec les ponts en plein cintre et en anse de panier; mais on doit s'arranger de manière que la partie des voutes qui se trouvera au dessus du niveau des plus hautes eaux n'offre pas une surface considérable.

Nous verrons plus loin comment on remédie en partie à cet inconvénient quand on n'a pas pu l'éviter.

Lorsqu'un pont est composé de plusieurs arches on peut: ou les faire toutes de la même largeur, ou donner plus de largeur à celle du milieu et faire décroître les autres d'autant plus qu'elles s'en éloignent davantage. Dans le premier cas, le pont est horizontal, cette disposition plait à l'œil et devrait être adoptée toutes les fois qu'elle n'entraine pas des rampes et des remblais trop considérables aux abords, s'il n'en résultait pas de difficulté

pour l'écoulement des eaux pluviales, nous verrons plus loin comment on peut remédier à cette difficulté.

Dans le second cas, le pont présente deux plans inclinés opposés l'un à l'autre. On peut alors donner une pente de 0m. 025 à 0m. 03 à la chaussée sur le pont. Cette disposition permet de faire écouler facilement les eaux sans les faire passer à travers la voûte et sans apporter d'entraves à la circulation du pont.

§. 5. _ Tracé des arches des Ponts

Plein cintre. La voûte en plein cintre est décrite d'un seul arc de cercle dont le rayon est égal à la demi-largeur de l'arche; il n'y a dès lors rien à en dire de particulier. Pl. XII.

Anse de panier. L'anse de panier est formée d'une suite d'arcs tangents les uns aux autres. Le but que l'on doit se proposer dans le choix des rayons est surtout d'éviter les jarrets au passage d'un arc à l'arc suivant. Diverses méthodes ont été indiquées pour atteindre ce but. Une des plus simples est celle qu'a donnée M. Michal, Inspecteur Général des Ponts et chaussées et qu'il a publiée dans les annales des ponts et chaussées.

Ce tracé est fondé sur cette double condition que tous les arcs correspondent à des angles égaux, et que les rayons de courbure sont les mêmes que ceux d'une ellipse ayant les mêmes axes. Ainsi soit à construire une anse de panier à trois centres (Fig. 7 Pl. XIII) dont la demi largeur est AR, et la montée Rh, nous décrivons une demi circonférence sur A'A comme diamètre, puis nous formons autour du point R, trois angles de 60° en menant les rayons RB RB'. Nous joignons les points A et B, B et H; par le point h nous menons hb parallèle à HB et nous prolongeons cette ligne jusqu'à la rencontre de AB en b; par le point b nous menons br^3 parallèle à BR; les points r', r^2, r^3 sont les centres des 3 arcs de cercle qui doivent former l'anse de panier.

En effet si des points r' et r^2 avec Ar' pour rayon je décris des arcs jusqu'à la rencontre de br^3, le cercle passera au point b intersection des droites Ab et hb, parceque les triangles Abr' sont isocèles par construction. Si du point r^3 avec br^3 pour rayon on décrit un autre cercle, il passera en h, puisque le triangle br^3h, semblable au triangle BRH, est isocèle, il sera de plus tangent aux deux premiers arcs de cercle que nous venons de tracer puisque les centres sont en ligne droite avec le point de contact b.

L'anse de panier à trois centres est applicable lorsque la montée de la voûte diffère peu de la demi-largeur, parceque la différence entre les rayons n'est pas considérable ; lorsque la montée est moindre que le ⅓ de l'ouverture, on est forcé d'employer plus de trois arcs de cercle, parceque le passage brusque d'un petit rayon à un grand fait paraître la courbe comme brisée au point de tangence. On emploie alors les courbes à 5, 7, 9, 11, 13 et 15 centres suivant le rapport de la montée à l'ouverture.

Pour les anses de panier à plus de trois centres, on suit une méthode de tracé analogue à celle que nous venons de décrire pour trois centres. Ainsi pour cinq centres on divise le demi-cercle tracé sur la ligne des naissances, en 5 parties égales ; on joint les points de division au centre du cercle (Fig. 2) ; on mène les cordes AB, BC et CH puis, par le point h on mène ch. Lorsque la construction en est arrivée là, on voit qu'en traçant une ligne parallèle à BC de manière à ce qu'elle coupe AB et ch dans l'angle ARH, les points d'intersection seront tels que si on mène par ces points des parallèles aux rayons BR et CR on déterminera les centres de deux cercles 0 comme r^3 et r^5 qui seront les centres d'arcs propres à former une anse de panier. Ainsi le problème est indéterminé.

Pour faire cesser l'indétermination on peut faire plusieurs hypothèses. M. Michal a supposé que celle qui conviendrait le mieux serait de prendre pour rayon les rayons de courbure de l'ellipse qui aurait les mêmes axes que l'anse de panier, ainsi le rayon

de courbure ayant pour expression :

$$R = \frac{\{1+y'^2\}^{3/2}}{y''}$$

il faudra substituer à la place de $\frac{dy'}{dx}$ et de $\frac{d^2y''}{dx^2}$, leurs valeurs tirées de l'équation de l'ellipse et faire cesser l'indétermination en introduisant dans l'expression de ce rayon de courbure la tangente de l'angle que fait ce rayon avec l'axe des x, tangente que nous nommerons K.

Soit a la demi-ouverture AR, b la montée Rh l'équation de l'ellipse sera :

$$a^2y^2 + b^2x^2 = a^2b^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

puisque la tangente est perpendiculaire au rayon de courbure, on a :

$$-\frac{1}{K} = y' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

On tire de l'équation de l'ellipse, en différenciant deux fois :

$$(3) \ldots a^2yy' + b^2x = 0 \text{ et } a^2y'^2 + a^2yy'' + b^2 = 0 \text{. d'où } y'' = \frac{b^2+a^2y'^2}{a^2y} \; (4)$$

Si l'on prend dans l'équation (3) la valeur de x qui est $x = -\frac{a^2yy'}{b^2}$ et qu'on la substitue dans l'équation (1) il vient :

$$a^2y^2 + \frac{b^2a^4y^2y'^2}{b^4} = a^2b^2$$

et en réduisant :

$$b^4 = b^2y^2 + a^2y^2y'^2 = y^2(b^2+a^2y'^2)$$

$$\text{d'où } y = \frac{\pm b^2}{(b^2+a^2y'^2)^{\frac{1}{2}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

substituant cette valeur de y (5) dans l'expression de y'' (4) nous aurons :

$$y'' = -\frac{(a^2y'^2+b^2)(b^2+a^2y'^2)^{1/2}}{a^2b^2} = -\frac{(a^2y'^2+b^2)^{3/2}}{a^2b^2}$$

substituant dans la valeur du rayon de courbure à la place de y' sa valeur $-\frac{1}{K}$ et à la place de y'' la valeur qui précède il viendra pour ce rayon :

$$R = \left(\frac{1+\frac{1}{K^2}}{a^2\frac{1}{K^2}+b^2}\right)^{3/2} a^2b^2 = \left(\frac{1+K^2}{a^2+b^2K^2}\right)^{3/2} a^2b^2;$$

Dans le cas où l'on ne considérerait que des anses de panier dans lesquelles la montée et la demi-ouverture seraient dans un rapport constant on aurait, en appelant m ce rapport $b = am$. Substituant il viendrait :

$$R = \frac{(1+K^2)^{3/2}}{(a^2+a^2K^2m^2)^{3/2}}\, a^4m^2 = \frac{(1+K^2)^{3/2}}{(1+K^2m^2)^{3/2}}\, a\, m^2$$

on pourrait donc calculer d'avance l'expression :

$$\frac{(1+K^2)^{3/2}}{(1+K^2m^2)^{3/2}}\, m^2$$

Pour différentes valeurs de m et de K. Ainsi pour la courbe à 5 centres K sera la tangente de l'angle de $\frac{180°}{5} = 36°$
Pour la courbe à 7 centres K sera la tangente de l'angle de $\frac{180°}{7} = 25°714$ pour le premier rayon et de $51°428$ pour le second
Pour la courbe de 9 centres on calculera le rapport du rayon à l'ouverture pour les trois angles $\frac{180°}{9} = 20°, 40°, 60°$ et $80°$.

On fera de même varier convenablement de centièmes en centièmes le rapport de la demi-ouverture à la montée, et on arrivera ainsi à former pour chaque espèce d'anse de panier un tableau qui évitera tout calcul ultérieur.

En effet, il suffira ensuite de multiplier les rapports ainsi obtenus par la demi-ouverture pour avoir la valeur du premier rayon, dans les anses de panier à 5 centres ; des deux premiers rayons dans celles à 7 centres, des trois premiers

dans celles à 9 centres &c.

Voici les tableaux calculés pour les anses de panier de 5 à 9 centres.

	Rapport de la montée b à l'ouverture entière 2 a	du 1er rayon br à la demi-ouverture a	du 2e rayon cr à la demi ouverture a	du 3e rayon dr à la demi ouverture a	Observations
	(1)	(2)	(3)	(4)	
Tableau pour les anses de panier à 5 centres	0. 36	0,553	.	.	Les rapports portés colonne (2) sont calculés en supposant que l'angle, dont la tangente est K, a 36° et que m est double des nombres portés en colonne (1)
	0, 35	0,530	.	.	
	0, 34	0,504	.	.	
	0, 33	0,477	.	.	
	0. 32	0,450	.	.	
	0, 31	0,423	.	.	
	0. 30	0,396	.	.	
Pour celles à 7 centres	0, 33	0,455	0,630	.	Les rapports portés dans les colonnes (2) et (3) sont calculés en supposant que l'angle dont la tangente est K, a 25°714 pour la colonne (2) et 51°428 pour la colonne (3) m est toujours double des nombres portés dans la colonne (1)
	0. 32	0,431	0.604	.	
	0. 31	0,406	0,578	.	
	0. 30	0,383	0.551	.	
	0. 29	0.359	0.525	.	
	0. 28	0. 336	0,498	.	
	0. 27	0.312	0.472	.	
	0. 26	0.289	0,445	.	
	0. 25	0.265	0.419	.	
Pour celles à 9 centres	0. 25	0,259	0.341	0.597	Les rapports portés dans les colonnes (2)(3) et (4) sont calculés en supposant que l'angle dont la tangente est K, a 20° pour la colonne (2), 40° pour la colonne (3) et 60° pour la colonne (4)
	0. 24	0.240	0, 318	0. 556	
	0. 23	0,222	0,296	0. 585	
	0, 22	0,203	0,276	0. 504	
	0. 21	0,185	0.251	0. 474	
	0. 22	0. 166	0,228	0. 445	

M. Lerouge, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées a supposé pour rendre le problème déterminé, que les rayons faisaient entr'eux des angles égaux comme dans le cas précédent et qu'ils croissaient en progression arithmétique

Voici comment, dans cette hypothèse, il est parvenu à déterminer les divers rayons.

Partant des mêmes données que précédemment et désignant par n le nombre entier et impair qui indique le nombre d'arcs de cercle, par m' le rapport de la moitié b à l'ouverture $2a$; par r_1 le plus petit rayon par d la différence entre les rayons successifs DE, EF et fig. 5 Pl XIII

L'angle correspondant à chaque arc sera évidemment égal à $\frac{\pi'}{n}$, et $\frac{n+1}{2}$ représentera le nombre des rayons différents dont la série sera désignée, en suivant l'ordre des longueurs par $r_1\ r_2 \ldots\ldots r_{\frac{n+1}{2}}$

Si l'on projette sur la verticale passant par le milieu de l'ouverture les distances successives des centres entr'eux ou les différences des rayons, la somme de ces projections ajoutée à la montée sera égale au plus grand rayon et on aura en appelant R ce rayon.

$$R = b + d\left(\cos\frac{\pi'}{2n} + \cos\frac{3\pi'}{2n} + \ldots\ldots \cos(n-2)\frac{\pi'}{2n}\right)$$

ou en mettant à la place de b sa valeur $2m'a$ et remarquant que $R = r_1 + \frac{n-1}{2}\, d$, on a

$$r_1 + d\,\frac{n-1}{2} = 2m'a + d\left(\cos\frac{\pi'}{2n} + \cos\frac{3\pi'}{2n} + \ldots\ldots \cos(n-2)\frac{\pi'}{2n}\right) \boxed{A}$$

en projetant les mêmes distances sur l'horizontale et remarquant que le petit rayon augmenté de ces projections est égal à la demi ouverture on aura

$$r_1 + d\left(\sin\frac{\pi'}{2n} + \sin\frac{3\pi'}{2n} + \ldots\ldots \sin(n-2)\frac{\pi'}{2n}\right) = a \boxed{B}$$

si on fait pour abréger la somme des cosinus égale à S, la

comme des sinus égale à α, les deux équations A et B deviendront

$$r_1 + \frac{n-1}{2}\, d = 2m'a + \beta d \quad \text{et} \quad r_1 + \alpha d = a$$

d'où l'on tire $d = \left(\frac{1-2m'}{2(\alpha+\beta)-(n-1)}\right) 2a$ et $r = \frac{(\beta + 2m'\alpha - \frac{n-1}{2})}{2(\alpha+\beta)-(n-1)}\, 2a$

A l'aide de ces deux formules on a calculé des tables qui donnent, comme dans la méthode de M. Michal, les différents rayons, lorsque l'on connaît l'ouverture et la montée. Le même Ingénieur a calculé des tables qui donnent les rapports du développement à l'ouverture et la hauteur moyenne du débouché, l'ouverture étant prise pour unité. Nous croyons que ces tableaux peuvent être utiles et nous les reproduisons ici.

	Rapport des montées à l'ouverture	Différences entre les rayons successifs l'ouverture étant prise pour unité	Rapports des rayons successifs à l'ouverture pour les 1.er rayon	2.e rayon	3.e rayon	Rapport du développement de l'intrados à l'ouverture	Hauteur réduite du débouché l'ouverture étant prise pour unité
Anses de panier à trois centres	0.380	0.327486	0.336077	0.663923	»	1.402158	0.303536
	0.390	0.300526	0.349737	0.650263	»	1.416212	0.310381
	0.400	0.273205	0.363397	0.636603	»	1.430265	0.318165
	0.410	0.245885	0.377058	0.622942	»	1.444318	0.325800
	0.420	0.218564	0.390718	0.609282	»	1.458371	0.333554
	0.430	0.191244	0.404378	0.595622	»	1.472424	0.341157
	0.440	0.163923	0.418038	0.581962	»	1.486477	0.348701
	0.450	0.136603	0.431699	0.568301	»	1.500531	0.356184
	0.460	0.109282	0.445359	0.554645	»	1.514584	0.363608
	0.470	0.081962	0.459019	0.540981	»	1.528637	0.370971
	0.480	0.054641	0.472679	0.527321	»	1.542690	0.378274
	0.490	0.027321	0.486340	0.513660	»	1.556743	0.385517
	0.500	0.000000	0.500000	0.500000	»	1.570796	0.392699

Anses de panier à cinq centres

Rapport des Montées à l'ouverture	Différence entre les rayons successifs l'ouverture étant prise pour unité	Rapports des rayons successifs à l'ouverture pour les			Rapport du développement de l'intrados à l'ouverture	Hauteur réduite du débouché l'ouverture étant prise pour unité
		1er rayon	2e rayon	3e rayon		
0.350	0.228 355	0.244 693	0.473 047	0.701 400	1.342 641	0.273 767
0.360	0.213 130	0.261 713	0.474 843	0.687 974	1.357 851	0.282 001
0.370	0.197 907	0.278 734	0.476 640	0.674 547	1.373 061	0.290 191
0.380	0.182 683	0.295 754	0.478 437	0.661 120	1.388 272	0.298 338
0.390	0.167 459	0.312 775	0.480 234	0.647 693	1.403 482	0.306 442
0.400	0.152 236	0.329 795	0.482 031	0.634 267	1.418 692	0.314 501
0.410	0.137 012	0.346 816	0.483 828	0.620 840	1.433 903	0.322 518
0.420	0.121 789	0.363 836	0.485 625	0.607 415	1.449 113	0.330 490
0.430	0.106 565	0.380 857	0.487 422	0.593 987	1.464 324	0.338 419
0.440	0.091 341	0.397 877	0.489 219	0.580 560	1.479 534	0.346 304
0.450	0.076 898	0.413 898	0.491 016	0.567 133	1.494 744	0.354 146
0.460	0.060 894	0.431 918	0.492 812	0.553 707	1.509 955	0.361 944
0.470	0.045 671	0.448 939	0.494 609	0.540 280	1.525 165	0.369 698
0.480	0.030 447	0.465 959	0.496 406	0.526 853	1.540 376	0.377 409
0.490	0.015 224	0.482 980	0.498 203	0.513 427	1.555 586	0.385 076
0.500	0.000 000	0.500 000	0.500 000	0.500 000	1.570 796	0.392 699

Anses de panier à 7 centres

Rapport des Montées à l'ouverture	Différence entre les rayons successifs l'ouverture étant prise pour unité	Rapport des rayons successifs à l'ouverture pour les					Rapport du développement de l'intrados à l'ouverture	Hauteur réduite du débouché l'ouverture étant prise pour unité
		1er rayon	2e rayon	3e rayon	4e rayon	5e rayon		
0.330	0.181 310	0.185 256	0.364 565	0.545 875	0.727 185	.	1.318 059	0.255 621
0.340	0.170 644	0.201 888	0.372 532	0.543 177	0.713 821	.	1.323 513	0.264 004
0.350	0.159 979	0.220 520	0.380 499	0.540 478	0.700 457	.	1.338 960	0.272 348
0.360	0.149 314	0.239 152	0.388 466	0.537 779	0.687 093	.	1.354 425	0.280 651
0.370	0.138 649	0.257 784	0.396 432	0.535 081	0.663 729	.	1.369 880	0.288 914
0.380	0.127 983	0.276 416	0.404 399	0.532 382	0.660 366	.	1.385 335	0.297 137
0.390	0.117 318	0.295 048	0.412 366	0.529 684	0.647 002	.	1.400 790	0.305 321
0.400	0.106 653	0.313 680	0.420 333	0.526 985	0.633 638	.	1.416 245	0.313 464
0.410	0.095 987	0.332 312	0.428 300	0.524 287	0.620 274	.	1.431 700	0.321 567
0.420	0.085 322	0.350 944	0.436 267	0.521 588	0.606 910	.	1.447 155	0.329 631
0.430	0.074 657	0.369 576	0.444 234	0.518 890	0.593 547	.	1.462 610	0.337 654
0.440	0.063 992	0.388 208	0.452 200	0.516 191	0.580 183	.	1.478 066	0.345 638
0.450	0.053 326	0.406 840	0.460 166	0.513 493	0.566 819	.	1.493 521	0.353 581
0.460	0.042 661	0.425 472	0.468 134	0.510 794	0.553 455	.	1.508 976	0.361 485
0.470	0.031 996	0.444 104	0.476 100	0.508 096	0.540 091	.	1.524 431	0.369 348
0.480	0.021 331	0.462 736	0.484 076	0.505 397	0.526 728	.	1.539 886	0.377 172
0.490	0.010 665	0.481 368	0.492 033	0.502 699	0.513 364	.	1.555 341	0.384 955
0.500	0.000 000	0.500 000	0.500 000	0.500 000	0.500 000	.	1.570 796	0.392 699

Anses de panier à 3 centres

Rapport de la Montée à l'ouverture	Différence entre les rayons successifs l'ouverture étant prise pour unité	Rapport des rayons successifs à l'ouverture pour les 1er rayon	2e rayon	3e rayon	4e rayon	5e rayon	Rapport du développement de l'intrados à l'ouverture	Hauteur réduite du débouché l'ouverture étant prise pour unité
0,320	0,148.144	0,147507	0,295651	0,443795	0,591939	0,740083	1,290800	0,246432
0,330	0,139914	0,167090	0,307004	0,446918	0,586832	0,726745	1,306355	0,254886
0,340	0,131684	0,186673	0,318357	0,450040	0,581724	0,713407	1,321911	0,263303
0,350	0,123453	0,206256	0,329709	0,453163	0,576616	0,700069	1,337466	0,271680
0,360	0,115223	0,225839	0,341062	0,456285	0,570508	0,686732	1,353021	0,280019
0,370	0,106993	0,245422	0,352415	0,459408	0,566401	0,673394	1,368577	0,288319
0,380	0,098763	0,265005	0,363767	0,462530	0,561293	0,660056	1,384133	0,296580
0,390	0,090532	0,284588	0,375120	0,465653	0,556185	0,646718	1,399687	0,304803
0,400	0,082302	0,304171	0,386473	0,468776	0,551077	0,633380	1,415243	0,312987
0,410	0,074072	0,323754	0,397826	0,471898	0,545970	0,620642	1,430798	0,321133
0,420	0,065842	0,343336	0,409178	0,475020	0,540862	0,606704	1,446352	0,329239
0,430	0,057612	0,362919	0,420531	0,478143	0,535754	0,583366	1,461909	0,337307
0,440	0,049381	0,382502	0,431884	0,481265	0,530646	0,580028	1,477464	0,345336
0,450	0,041151	0,402085	0,443236	0,484388	0,525539	0,566690	1,493020	0,353327
0,460	0,032921	0,421668	0,454589	0,487510	0,520431	0,553353	1,508575	0,361279
0,470	0,024691	0,441251	0,465942	0,490633	0,515323	0,540014	1,524130	0,369192
0,480	0,016460	0,460834	0,477295	0,403755	0,510215	0,566676	1,539686	0,377066
0,490	0,008230	0,480417	0,488647	0,494878	0,505108	0,513338	1,555241	0,384902
0,500	0,000000	0,500000	0,500000	0,500000	0,500000	0,500000	1,570796	0,392696

Tracé des Arcs de Cercle

Le tracé des ponts en arc de cercle est aussi facile que celui du

plein cintre, lorsqu'on a déterminé le rayon avec lequel l'arc doit être décrit. Cette détermination résulte de la flèche ou montée de la voûte, c'est-à-dire de la différence de niveau entre les naissances et l'intrados. Cette montée est quelquefois la conséquence des données du problème, cela arrive quand on est conduit par ces données à élever l'intrados au dessus des naissances, de plus de $\frac{1}{8}$ de l'ouverture, quand au contraire les circonstances locales exigeraient moins, on augmente la montée jusqu'à cette limite minima si on donnait une flèche moindre il y aurait trop peu de différence entre le développement de l'intrados et celui de l'extrados, la voûte serait soumise à une trop grande pression et les culées devraient être construites, avec des soins particuliers pour résister à la poussée. Cependant on a réduit la flèche au $\frac{1}{10}$ dans quelques circonstances exceptionnelles.

Pour obtenir le rayon, connaissant la flèche, on compare les triangles ABC et Bdo, et on en tire

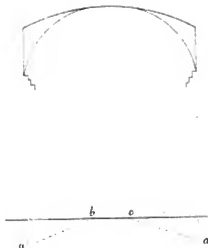
$$Bo = \frac{AB \times \frac{AB}{2}}{BC} = \frac{\overline{AB}^2}{2BC}$$

et en représentant AC par l, et BC par f..... $BO = \frac{l^2+f^2}{2f}$

Évidement des Tympans.

On peut être conduit à adopter une forme de voûte en plein cintre, en anse de panier, ou même en arc de cercle, telle que les naissances se trouvent beaucoup au dessous du niveau des plus grandes eaux. On a cherché différents moyens pour remédier à la diminution du débouché qui résulte de cette forme.

On a d'abord évidé les tympans en y perçant des trous de différentes formes : ronds ou curvilignes. Il résulte de cette disposition une grande difficulté dans l'appareil, et on gagne peu de chose sur le débouché parceque l'eau ne coule pas facilement dans les espèces de tuyaux que l'on a ainsi ouverts dans la maçonnerie.



Plus tard aux ponts de Neuilly, de Bordeaux &c. on a adopté une disposition plus convenable. On a surhaussé les naissances de la voûte dans le plan des têtes, en les plaçant au niveau des plus grandes eaux, et on a disposé la douelle suivant une surface gauche engendrée par une droite qui passe toujours par un plan normal à la surface cylindrique de la voûte et s'appuie d'une part sur l'arc de tête et de l'autre sur la courbe que donne l'intersection de la voûte cylindrique par deux plans biais a b et c d, qui sont plus ou moins évasés suivant les circonstances locales (Voir planche XV, fig 3)

§. 6. Forme des Piles

Les Piles sont, comme nous l'avons vu, les soutiens isolés destinés à supporter les voûtes des ponts. La partie antérieure se nomme avant bec, la partie postérieure, l'arrière bec, les côtés latéraux portent le nom de faces. La forme de ces piles n'est pas sans importance; car elles apportent une perturbation très sensible dans l'écoulement de l'eau, il en résulte d'une part tourbillonnement dans la masse fluide, de l'autre accélération de vitesse au passage de l'eau sous le pont et par suite affouillement probable du fond du lit autour des piles.

Il y avait donc intérêt à rechercher la forme la plus favorable à leur donner. c'est ce qu'a fait Mr. Gauthey. Il a expérimenté les diverses formes possibles. Nous ne rapporterons que les principales expériences.

Un avant bec rectangulaire produisait un remous qui formait un bourrelet très-élevé, à peu près circulaire autour de la pile, tandis que deux autres intumescences curvilignes partaient des angles

Il y avait chute presque verticale aux angles d'amont et

l'effet produit par la pile se faisait sentir à une grande distance ; car lorsqu'on remplaçait la pile par deux culées rectangulaires, les bourrelets se rejoignaient dans le milieu du canal.

(Les expériences étaient faites dans un canal rectangulaire, de 0m.50 de largeur où l'eau coulait sur une épaisseur de 0m.04 avec une vitesse de 3m,90 par seconde.)

Avec un avant bec demi circulaire (3e expérience), le bourrelet en avant de la pile était à peu près aussi élevé mais moins large que dans l'expérience précédente ; au milieu des faces du corps carré de la pile, l'eau conservait à peu près son niveau primitif, il n'y avait pas de chute à l'avant bec

Avec un triangle équilatéral les effets étaient à peu près analogues à ceux qui ont lieu avec l'avant bec demi-circulaire, seulement le bourrelet était moins élevé et la perturbation un peu moindre. Mais la chute subsistait cependant encore.

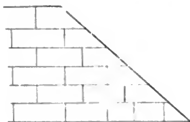
Lorsqu'on formait l'avant bec de deux arcs de cercle dont les centres étaient respectivement placés sur les faces de la pile, l'eau s'élevait beaucoup moins en avant de la pile que dans les expériences précédentes, il n'y avait plus de chûte à la naissance de l'avant bec.

Enfin on a fait des expériences avec l'avant bec de la cinquième expérience, mais en y rattachant des naissances de voûtes. Le remous est devenu très-considérable et les courants ont divergé à peu près autant que dans l'expérience sur la rectangulaire. Il résulte de ces détails que la forme que l'on devrait préférer est celle qui est tracée avec deux arcs de cercle puisqu'elle produit le moins de perturbation dans le mouvement de l'eau. Mais on doit remarquer que l'angle aigu formé par les deux arcs de cercle qui se coupent, ne pourrait pas résister au choc des glaces et des corps flottants, et qu'il lui arriverait comme aux avant-becs triangulaires, d'être promptement endommagé

On préfère donc, en général, la forme demi circulaire qui ne

produit par la chûte sur les faces de la pile, mais occasionne cependant un remous assez considérable.

Dans certains cas où il serait très important de diminuer la contraction, il conviendrait d'adopter une forme elliptique se rapprochant de celle de l'expérience 5, on éviterait ainsi une partie de l'inconvénient qu'on vient de signaler sans produire un aussi fort remous qu'avec un avant bec demi-circulaire.



On a quelquefois disposé l'avant-bec avec une pente, comme l'indique la figure ci-contre; il en résulte que si le plan incliné répond à la hauteur des débacles, les glaçons qui viennent le choquer s'élèvent sur l'arête du cône et se cassent par l'effet du porte-à-faux qui en résulte. Si la rivière n'est pas navigable, il ne peut y avoir que des avantages à cette disposition, mais si la navigation y est établie, comme les bateaux peuvent venir choquer les piles et qu'ils se rompraient comme les glaçons, on aurait tort d'admettre cette forme.

Dans les ponts en plein cintre, les avant-becs des piles s'élèvent au dessus des plus hautes eaux, quand même les naissances seraient placées à l'étiage comme aux anciens ponts de Paris et au pont de Sèvres (Pl. XIV) Ils ont toujours, même dans ce cas défavorable, l'avantage de rompre les glaces et de diminuer un peu la contraction, et par suite le remous.

Dans les ponts en anse de panier, on les dispose de même, par les mêmes raisons.

Dans les ponts en arc de cercle les piles s'arrêtent à la hauteur des naissances (Pl. XV). On est dans l'usage de les terminer par un bandeau qui est placé à 0m.08 ou 0m.10 au dessous des naissances, et règne sur tout le pourtour de la pile. Voir Planche (XXIX), le pont d'Iéna; ce bandeau est proportionné pour la hauteur, à l'épaisseur et à la hauteur apparente de la pile. Au pont de Neuilly dont les arches ont 39m d'ouverture et pour les

piles de 6m de hauteur et 4m d'épaisseur, on a donné 0m.50 d'épaisseur au bandeau (Pl. XV.)

Les avant-becs sont couronnés par des demi-cônes très surbaissés, n'ayant pour hauteur que l'épaisseur de l'assise du plan de tête qui est placée au dessus du bandeau. Voir la planche XIV et les fig 1 et 3 de la planche XV.

Dans les ponts en anse de panier ou en plein cintre qui ont des avant-becs triangulaires on conserve quelquefois cette même forme triangulaire au couronnement des avant et arrière-becs. Pour que les assises superposées ne soient pas terminées par des angles aigus qui s'écorneraient, on les coupe de manière à former à chaque assise un petit ressaut, comme l'indique la fig 13 de la planche XXIX.

En général les piles ont leurs faces inclinées, c'est-à-dire qu'elles sont plus minces du haut que du bas. Le fruit dépend des dispositions locales, il ne doit pas dépasser un maximum de 1/15 à 1/20.

Outre cette épaisseur des piles à leur pied, il convient de leur donner de l'empattement en faisant saillir les assises inférieures les unes sur les autres jusqu'au niveau de l'étiage. La saillie est de 0m05 à 0m.10 et même 0m.20 suivant que les piles sont plus ou moins grosses.

§. 7. Appareil des voûtes de ponts.

Considérations générales.

Les voûtes en pierres de taille, sont composées de blocs distincts auxquels on donne le nom de voussoirs. Dans chaque voussoir il y a plusieurs faces dont la taille demande la plus grande

attention de la part de l'appareilleur, Ce sont:

1° La face destinée à faire parement, et qui devant être une partie visible de la voûte doit être exécutée avec la plus grande précision, on la nomme la douelle

2° La face de tête comprise dans le plan vertical qui limite la voûte.

3° Les joints qui sont les faces suivant lesquelles les voussoirs s'appuient les uns sur les autres. Ils ont besoin d'être taillés avec assez de soin pour que les deux surfaces des voussoirs opposés aient le plus grand nombre possible de points de contact et que la pression se répartisse uniformément. Il faut donc que dans chaque voussoir les joints approchent autant qu'on le peut de la véritable surface dont ils doivent faire partie et pour que ce but soit facilement atteint, il faut que la surface soit la plus simple possible. C'est par ce motif que l'on fait en général les joints plans; mais les surfaces de toutes les voûtes ne comportent pas cette disposition.

Il faut donc choisir pour les plans de joint une surface dont la génération soit simple et que l'on puisse exécuter avec précision. C'est pour cela que l'on a donné la préférence aux surfaces sur lesquelles une ligne droite peut s'appliquer et qui sont ou planes ou développables ou au moins réglées.

Quand on fait le choix de cette surface, on doit s'astreindre à cette condition, que la génératrice du joint soit constamment normale à la surface de l'intrados. Car si les deux angles étaient sensiblement inégaux, celui des deux qui excéderait l'angle droit serait plus résistant que l'autre, et il y aurait chance de rupture du plus faible.

Si les joints par lesquels les voussoirs se transmettent la pression doivent être formés par des surfaces normales à la surface de douelle, il faut également que les lignes de division

des voussoirs dans l'autre sens soient normales aux arêtes de douelle. Cette condition est importante aussi bien pour la solidité de la voûte que pour la facilité de l'exécution.

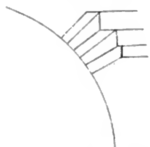
Voûtes droites. Dans les voûtes droites, ces principes généraux reçoivent leur application, puisque les plans de joint passant par les génératrices sont normaux au cylindre d'intrados et que les plans qui limitent les voussoirs parallèlement aux têtes sont perpendiculaires aux génératrices. Dans ce cas, les lignes tracées sur l'intrados de la voûte, par les faces de contact des voussoirs, sont les lignes de moindre et de plus grande courbure.

Les voûtes des grands ponts sont comme celles des ponceaux, divisées en un nombre impair de voussoirs séparés par des plans de joints normaux à la courbe d'intrados. L'épaisseur de ces voussoirs dépend de l'épaisseur des bancs de pierre que fournit la localité où le pont doit être construit. Cependant il ne faudrait pas leur donner trop de longueur par rapport à leur épaisseur parcequ'ils seraient exposés à se rompre. Ceux du pont de Neuilly qui peuvent être considérés comme les plus longs que l'on ait employés ont 1m 80 de largeur sur 0m 46 d'épaisseur à la douelle; on les dispose alors en plusieurs morceaux, lorsqu'on ne trouve pas des pierres assez grandes pour les faire en un seul

La solidité exige que les voussoirs se raccordent par des faces verticales et horizontales avec les assises courantes des tympans. Dans les voûtes en arcs de cercle qui ont 1/7 ou 1/8 de flèche, ces raccordements se font sans difficulté parceque (Voir Pl XV) fig 1, le pont Ste Maxence, planche XV fig. 3 le pont d'Iéna) les plans de joint font avec la verticale des angles qui varient peu de l'un des joints voisins. Il en est de même au pont de Neuilly qui, quoique disposé en anse de panier, a ses têtes appareillées comme un pont en arc de cercle (Voir

Pl XV fig. 3.

Mais dans les ponts en anse de panier le raccordement des assises courantes avec les voussoirs donne lieu à une espèce d'escalier dont la largeur des marches va en augmentant. Pour remédier à cet inconvénient et régulariser les ressauts ou gradins, on allonge les voussoirs à mesure que l'on s'élève, c'est ce qu'on a fait au pont de Tours. Quelquefois comme au pont de Mantes (fig. ci contre) on a fait aboutir deux plans de joints à l'angle saillant d'un ressaut, cette disposition est vicieuse parceque les deux angles aigus réunis pour former un angle droit sont trop fragiles. Dans quelques cas, au pont de Sèvres, par exemple, Pl XIV. on a disposé les gradins le mieux que l'on a pu, mais comme il en résultait encore un effet désagréable, on a fait saillir les voussoirs de tête, et on les a extradossés suivant un arc de cercle dont le centre est un peu plus élevé que celui de l'arc de l'intrados de manière à le faire aboutir au dessus de l'avant bec et on a fortement refouillé les joints, afin de former des bossages très-prononcés, à coté desquels le surplus de l'appareil réel ne parait pas.



Dans d'autres ponts où les tympans étaient construits en petits matériaux, pour ne pas faire les frais du prolongement des voussoirs au delà de l'arc d'extrados, on les a terminés à cet arc même. Cette disposition a été généralement adoptée à tous les ponts construits sur les chemins de fer aux environs de Paris.

Nous avons vu que les grands ponts ne pouvaient pas avoir en général une largeur égale à celle des routes auxquelles ils aboutissent. Dans ce cas si on ne prenait aucune précaution et si l'enracinement du pont dans la berge avait la largeur de ce pont, il arriverait de fréquents accidents.

On est donc dans l'usage d'allonger la culée et de lui

donner une largeur égale à la longueur de la route. Il résulte de là que les têtes du pont viennent s'appuyer normalement contre les paraments verticaux des culées. Si les voûtes sont en anse de panier ou en plein cintre, l'appareil des têtes peut se faire à la jonction des culées, comme à la jonction des piles, et l'on peut n'apporter aucune modification à la culée. Mais dans les ponts en arc de cercle, où les voussoirs inférieurs s'étendent beaucoup au delà du parement des piédroits, on ne peut sans choquer toutes les règles du goût, placer les culées et les murs en prolongement dans le plan des piédroits de la voûte. Il faut alors adosser à la culée une demi pile au dessus de laquelle l'appareil se dessine comme au dessus des autres piles. Il résulte de cette disposition une légère augmentation de dépense, parcequ'il faut plus de pierres de taille et plus de taille; mais le cube total de la maçonnerie n'est pas sensiblement accru par la saillie de la demi-pile comptée dans l'épaisseur de la culée.

(Voir les ponts de St. Maxence et de Neuilly. Pl. XV)

Quoique cette disposition ne soit pas nécessaire dans les ponts en plein cintre et dans ceux en anse de panier, elle est souvent adoptée parce qu'elle ajoute à l'élégance de la construction (Voir le pont de Sèvres Pl. XIV)

Voûtes biaises.

Comme on vient de le voir, l'appareil des voûtes ne présente aucune difficulté lorsque ces voûtes sont perpendiculaires aux têtes qui les terminent. Mais lorsqu'un canal, un chemin de fer, viennent couper obliquement un cours d'eau, une route, une vallée et qu'il est impossible de détourner une des deux voies, on est conduit à construire des ponts dont les voûtes sont plus ou moins biaises par rapport aux plans des têtes. Pour assurer la solidité de ces voutes et de leurs piédroits, il faut disposer l'appareil

de ces voûtes d'une manière particulière dès que le biais dépasse quelques degrés.

On reconnait, en effet qu'il est impossible de prendre pour limites des voussoirs les lignes de plus grande et de plus petite courbure, puisque les voussoirs extrêmes se termineraient en pointe. On remarque de plus que quand on enlève le cintre sur lequel la voûte a été construite, c'est-à-dire quand on l'abandonne à son propre poids, la partie centrale dans les voûtes d'épaisseur convenable, tend à repousser la partie inférieure, et il y a une compression générale de tous les matériaux dont la maçonnerie est composée. Dans une voûte droite, la compression est uniforme dans le sens normal aux génératrices, mais dans une voûte(*) qui est absolument sans contre-pression, une autre qui en a une insuffisante, et de plus une poussée qui s'exerce sur un angle saillant quand le pont est accompagné de murs en retour dans le prolongement des têtes. On remarque en même temps que la compression est nécessairement la plus grande dans le plan normal à la direction du cylindre, puisque c'est dans ce plan que, pour une contraction donnée des matériaux, la différence de l'arc primitif d'intrados à l'arc contracté est la plus grande. Elle diminue progressivement si on la considère dans des plans qui s'éloignent de plus en plus de la section normale, de sorte que si l'on suppose une voûte biaise dont les têtes a b et c d sont assez rapprochées pour qu'une section a e normale aux génératrices, sorte de la voûte de f en e, la section de plus grande contraction sera projetée suivant a d

Il résulte de ces considérations que le meilleur moyen de construire une voûte biaise solide serait de la composer d'une suite de petites voûtes droites dont les poussées s'exerceraient isolément. Mais dans ce système (adopté pour quelques anciens ponts) l'intrados est disposé par redans d'un effet-

(*) biaise il y a une partie de la voûte

peu satisfaisant. Jusqu'à ces derniers temps on avait peu exécuté de voûtes, suivant ce mode de construction ; on l'a appliqué à un des ponts du chemin de fer de l'Ouest.

On a quelquefois résolu le problème en substituant à la surface cylindrique une surface gauche engendrée par une ligne, qui, s'appuyant sur les cercles de tête passait par une perpendiculaire à ces têtes placée dans le plan des naissances, symétriquement par rapport aux cercles de tête. Cette construction n'est pas applicable aux ponts très biais, comme la construction des chemins de fer a forcé d'en établir.

Appareil Hélicoïdal

Les Anglais, qui, les premiers, ont été appelés à exécuter ce genre de construction, ont imaginé un appareil qui s'accorde avec la nature des matériaux qu'ils ont à leur disposition nous voulons parler des briques. Voici en quoi consiste cet appareil :

Soient AB et CD les deux culées d'un pont dont AC et BD représentent les traces horizontales des plans de tête (Pl XVI fig 3 et 4), BED. le cercle d'une des têtes divisé en un nombre impair de voussoirs extradossés à un cercle parallèle à l'intrados (fig 1 et 3). On développe le cylindre dont les têtes sont en plein cintre, et on obtient un développement pour les courbures de tête les lignes A'a e C' et B'b d D', on joint C' et A', D' et B', puis après avoir divisé les cercles de tête et leurs développés en autant de parties que l'on peut avoir de voussoirs, on mène, par chacun des points de division des cercles de tête développés, des normales aux droites C'A' et D'B'; si les normales, partant des points de division pris sur une des courbes de tête, ne tombent pas sur les points de division, de l'autre tête, on les dévie un peu pour

les faire aboutir exactement sur ceux qui s'en rapprochent le plus. Ces normales, ou ces quasi normales sont prises pour les lignes suivant lesquelles doivent passer les plans de joint, ou comme les lignes de douelle. Ceci fait on ramène en plan et en élévation chacune de ces lignes de douelle, ce qui se fait en traçant les génératrices du cylindre et projetant sur le plan les intersections de ces deux systèmes de droites tracées sur le développement.

Pour obtenir en plan la projection des voussoirs, après avoir fixé leur longueur, on mène sur le plan horizontal parallèlement à chaque tête, les traces de deux plans verticaux répondant aux voussoirs longs et aux voussoirs courts; les intersections de ces plans par les génératrices donnent le moyen d'obtenir sur le développement de la surface de douelle, la douelle de chacun des voussoirs. On obtiendra ensuite très facilement la projection verticale de ces mêmes voussoirs en coupant les arêtes de douelle par des plans verticaux parallèles aux têtes et projetant les intersections des génératrices par ces plans sur les projections verticales des cercles résultant de l'intersection de la voûte par ces mêmes plans.

Ces diverses constructions donnent ainsi en projection horizontale et en projection verticale la face de tête de chaque voussoir et la face de douelle, on a de plus celle-ci en vraie grandeur dans le développement du cylindre.

Il est convenable de placer aux naissances, sur toute la longueur du pont, une assise en pierre de taille que l'on taille à redans pour se raccorder avec les lignes de voussoirs qui viennent aboutir aux naissances et qui sans cela se termineraient en pointe. Pour arriver à construire un voussoir au moyen de ces données, d'après les principes généraux que nous avons posés, il faudrait que les surfaces de joint fussent formées par la suite des normales au cylindre passant par la courbe de douelle, mais cette construction serait excessivement longue, elle aurait

d'abord pour résultat de donner par l'intersection de la surface de joint avec le plan de tête des lignes courbes que déjà nous avons supposé remplacées par les normales au cercle, dont elles diffèrent très peu. Nous remarquons de plus que la surface des joints pour les voussoirs de tête diffère très peu du plan passant par la ligne de joint sur la tête et par la ligne de douelle.

Cela posé, pour tailler un voussoir nous avons la surface de douelle et la face de tête, ainsi il ne nous manque que la position du panneau de tête par rapport au panneau de douelle. Pour la déterminer, soit $m\,n\,p\,q\,r\,s$ un voussoir en projection, nous remarquons que le problème sera résolu si nous connaissons pour chaque joint l'angle formé par la ligne de douelle et par la ligne du joint de tête. Prenons par exemple le plan de joint $m\,p\,s$, nous connaissons $m\,p$ et $p\,s$ en vraie grandeur, $m\,p$ sur le développement du cylindre, $p\,s$ sur la projection de la tête. Nous avons de plus la projection horizontale $m''\,s''$ et la projection verticale de $m\,s$, nous pourrons donc construire sa vraie grandeur, mais comme la projection horizontale peut n'être pas très exacte on arrive à un résultat plus sûr en observant que cette même ligne $m\,s$ est l'hypothénuse d'un triangle rectangle dont la projection verticale $m\,s$ est un côté et dont l'autre côté est la longueur réelle des voussoirs, mesurée entre le plan de tête et le plan parallèle qui limite les voussoirs. Ainsi sur $m\,s$ nous élèverons une perpendiculaire $s\,s'$ égale à la longueur de queue des voussoirs, et joignant m et s' nous aurons la vraie grandeur de la ligne $m\,s$. Nous pourrons donc construire sur le développement du cylindre le triangle $m'\,p'\,s'''$, dont nous connaîtrons les trois côtés. Ayant ainsi le panneau de douelle, le panneau de tête et le panneau de joint, la taille du voussoir sera facile.

Dans ce mode d'appareil les lignes de douelle ne sont perpendiculaires nulle part aux plans des têtes, de sorte que

dans les ponts très biais les voussoirs inférieurs glissent sur leurs plans de joint, tant qu'ils n'y sont pas retenus par le frottement, et que les lignes de douelle viennent couper obliquement les lignes des naissances. On remédie en partie à ce défaut, mais rien ne remédie au défaut d'obliquité.

Appareil Orthogonal.

C'est pour éviter tous ces inconvénients que les Ingénieurs des Chemins de St Germain et de Versailles ont imaginé un autre appareil qui, sous le rapport de la stabilité offre les plus grands avantages, mais auquel on a rarement recours parcequ'il oblige à tailler tous les moellons de la voûte. Voici en quoi il consiste: On construit, comme dans l'appareil hélicoïdal des Anglais, le développement des courbes de tête, et partant de ces courbes, on trace les lignes de douelle de manière qu'elles soient normales à ces courbes et à une suite de courbes parallèles à ces mêmes courbes de tête infiniment rapprochées les unes des autres. Pour obtenir ce tracé rigoureux, il faut avoir l'équation de la ligne de douelle qui satisfait à la condition que nous venons d'énoncer. Mais la recherche de cette équation exige des calculs longs et difficiles; elle n'est pas à la portée des ouvriers qui, en définitive, sont appelés à exécuter l'appareil; dès lors il paraît préférable de prendre une solution qui soit comprise par tous les appareilleurs.

Soient (Pl. XVII fig. 3) AD et BC les deux culées du pont à construire. AOB la projection de la tête AB sur le plan vertical.

Nous développons le cylindre de la voûte et nous obtenons sur ce développement les courbes de tête. Nous obtiendrons de même d'autres courbes qui seraient le développement des sections faites dans la voûte par une suite de plans équidistants parallèles aux têtes. Les lignes de douelle doivent être perpendiculaires à toutes ces courbes.

Si elles sont suffisamment rapprochées, on pourra obtenir une ligne de douelle quelconque en partant d'un des points de division des voussoirs de tête et menant une normale à cette courbe jusqu'à la courbe voisine, puis, par ce point de rencontre une normale à la seconde courbe et ainsi de suite jusqu'à l'autre tête. On trace toutes les autres de la même manière

Lorsqu'on a ainsi obtenu une trajectoire orthogonale et par conséquent qu'on a tracé toutes les lignes de douelle, on n'a plus, pour arriver à tailler les voussoirs qu'à faire l'opération que nous avons décrite pour l'appareil hélicoïdal.

On voit qu'en suivant à la rigueur ces principes l'appareil d'une des têtes déterminerait l'appareil de l'autre tête. On ne peut pas agir ainsi, il faut que les deux têtes soient semblables. Comme le remplissage de la voûte se fait en petits matériaux, on peut, en trichant un peu, faire arriver les lignes de douelle aux plans de joint des voussoirs

L'inconvénient de cet appareil c'est que les assises des voussoirs de remplissage ne sont pas égales, elles se resserrent quelquefois beaucoup, lorsque les ponts sont un peu longs, et cela devient tel que pour une voûte très longue, l'appareil serait inapplicable.

Pour exécuter ces voûtes et éviter les lézardes qui tendent à se produire par l'inégalité des poussées vers les têtes, nous avons vu qu'il convenait de les diviser en zônes; c'est ce que l'on a fait à plusieurs ponts du chemin de fer de Versailles (Rive droite) Afin de s'assurer de la pose exacte des voussoirs, le cintre de la voûte était recouvert d'une aire en plâtre et sur cette aire, on traçait toutes les lignes de douelle, de sorte que les maçons n'avaient qu'à suivre ces lignes. Pour former les lignes de séparation des zônes on traçait de plus les courbes parallèles aux têtes suivant lesquelles ces zônes devaient être séparées; de deux en deux rangs de moellons on les faisait se toucher sur

sur cette ligne, et en laissant vide la place d'un moellon dans l'intervalle.

A certains ponts des environs de Paris, on a construit la voûte sans former de zônes, mais on a eu la précaution de relier les têtes à la voûte par des tirants en fer. Nous n'affirmerons pas que la stabilité de ces ponts a tenu à ces tirants; mais ce qui est certain, c'est qu'aucune lézarde ne s'est formée au décintrement, quoique le travail se soit fait par un assez mauvais temps

Appareil Orthogonal convergent.

Dans ce cas, au lieu de tracer une courbe perpendiculaire aux sections successives faites par des plans parallèles, on la trace normale a des sections dont les plans concourent vers une verticale passant en un point O (Pl XVI fig. 5) On n'a pas encore donné de construction graphique du tracé de la trajectoire dans ce cas particulier. Nous pensons que l'on arrivera à une solution suffisamment approchée si l'on trace sur le développement du cylindre, outre la courbe de tête, les intersections du cylindre par une suite de plans convergents et si, après avoir développé le cylindre, on mène les trajectoires perpendiculaires à ces courbes dont les rayons de courbure sont assez grands pour que les normales ainsi menées ne soient pas très-éloignées de leur véritable position

Le tracé des développements des intersections du cylindre par les plans convergents est facile. En développant le cercle directeur de la section droite, on indique la position des génératrices g, h, e, d, c, b, a, f, tant sur le développement qu'en projection horizontale. Les génératrices coupent les traces des différents plans convergents oi, oj, ok, &c. en des points comme s's"s'"........ que l'on projette sur le développement en $S_1 S_2 S_3$.....

et l'on a ainsi très facilement le développement d'autant de courbes que l'on veut. Cela fait, on détermine la forme des voussoirs comme dans l'appareil Anglais.

On peut également appliquer l'appareil héliçoïdal en menant sur le développement la ligne S'v, et en traçant les lignes de douelles à peu près perpendiculaires à la ligne SS'v' afin qu'elles tombent sur les points de rencontre des voussoirs de la voute droite avec le plan g f'.

Lorsque l'on n'a pas d'appareilleur capable d'appliquer les méthodes qui viennent d'être indiquées pour l'appareil de tous les ponts biais, on peut venir à bout de traiter convenablement les voussoirs, en établissant le cintre avant de préparer les voussoirs et en indiquant sur le cintre même les divisions des voussoirs de tête, ainsi que les lignes de douelles qui, partant de ces points de division, sont tracées au moyen d'un cordeau dirigé au moyen d'une équerre perpendiculairement aux têtes. Cela fait, on représente les joints de tête des voussoirs dans leur véritable position par des fils de fer fixés par des pitons à œil, d'un bout aux divisions des voussoirs sur le cercle de tête, et de l'autre à un cadre en bois placé dans le plan des têtes.

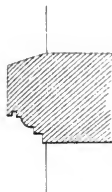
On mesure ainsi sur place, avec une fausse équerre les angles trièdres et on obtient ainsi les panneaux nécessaires pour la taille des voussoirs.

M. Morandière, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a indiqué ce moyen dans une note insérée en 1855 dans les annales des Ponts et Chaussées.

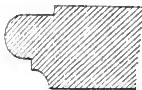
---

§. 9

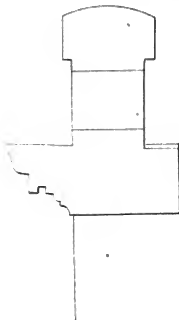
§. 9. Plinthe, Corniche, Parapet Abords des Ponts.



Sur l'extrados des voussoirs et parallèlement à la chaussée du pont, on place toujours une assise qui fait saillie sur le parement des têtes. Dans les ponts de faible ouverture et d'une seule arche, on se contente ordinairement d'un simple bandeau de 0m 10 à 0m 12 de saillie portant larmier sous sa face inférieure ; quelquefois on adopte en dessous du larmier un quart de rond accompagné d'un ou deux filets.



Dans les grands ponts il faut que le bandeau ait plus de saillie, on lui donne alors la forme d'une corniche avec modillons ou consoles plus ou moins ornés, ou simplement un tore avec filet et cavet en dessous. La saillie et l'épaisseur sont proportionnées à la hauteur du pont, et on peut suivre dans la détermination de ces dimensions des principes analogues à ceux que l'on suit en architecture.

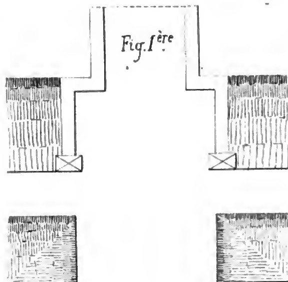


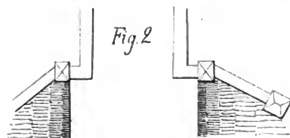
Sur la corniche, on élève le parapet ou bahut. On construit ordinairement le parapet en deux assises, sans compter une légère saillie de la corniche dans le parapet. Il convient que l'assise supérieure porte un petit bandeau. Les parapets d'une seule pierre mise de champ, comme au pont Royal, sont d'un effet moins satisfaisant.

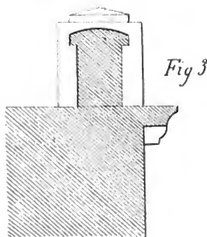
Les abords des ponts sont disposés de diverses manières suivant la position qu'ils occupent. Dans les villes les culées font ordinairement suite aux murs de quai que le pont met en communication. Cette

disposition n'offre rien de particulier.

Lorsque le pont est isolé et s'enracine dans des berges formées de talus, on l'y rattache, soit par des murs en prolongement de culées et des murs en retour d'équerre. (fig 1) soit par des murs en aile quand il n'y a pas de rampe pour descendre de la levée du pont sur les berges basses de la rivière.







Dans l'un comme dans l'autre cas, il y a lieu de défendre les talus qui se rattachent soit aux murs en retour, soit aux murs en aile, par des perrés ou revêtements en pierre. Sans cette précaution, les terres s'éboulent et mettent à découvert les parties de parement qui souvent n'ont pas été construites en matériaux propres à résister à l'action de la gelée et qui, dans tous les cas ne sont pas exécutés avec les soins qu'exigent les parements destinés à être vus.

Les murs en retour et les murs en prolongement, se terminent toujours par des dez ou massifs en pierres carrés plus épais plus larges et plus hauts que les bahuts ou parapets du pont. (Fig.3)

On défend les dez et les bahuts du choc des voitures par des trottoirs. On les défendait autrefois par des bornes ou demi-bornes adossées aux uns et aux autres; mais on a renoncé à ce mode de défense qui a l'inconvénient de gêner la circulation tandis que les trottoirs la favorisent.

§. 10. Poussée des Voûtes.

Une voûte est ordinairement formée d'un assemblage de pierres que l'on nomme voussoirs, disposées de manière à recouvrir un espace vide compris entre les deux appuis de la voûte que l'on nomme piédroits ou culées. Nous avons dit ordinairement, parcequ'il existe des voûtes moulées en béton qui ne forment qu'un seul bloc.

On conçoit facilement qu'une telle construction ne peut subsister, c'est-à-dire que les pierres qui forment la voûte ne peuvent se soutenir, qu'autant qu'elles sont liées entr'elles de manière à ne pas se détacher par l'effort que font les matériaux placés au dessus du vide de la voûte pour obéir à l'action de la pesanteur, ou que les efforts exercés par la pesanteur sur chaque voussoir sont détruits par les efforts contraires qu'il reçoit des voussoirs qui l'avoisinent. Dans ce dernier cas, si l'on est arrivé à la limite de la stabilité de la voûte, c'est-à-dire au moment où l'équilibre va se rompre, on remarque en général.

1°. Que la voûte s'ouvre à la clef à l'intrados

2°. Qu'elle s'ouvre à quelque distance à droite et à gauche de la clef, mais à l'extrados, en deux points placés dans ce qu'on appelle les reins de la voûte.

3°. Enfin, que les deux piédroits se soulèvent à leur partie inférieure du côté du vide, en tournant par conséquent autour de l'arête extérieure de leur base.

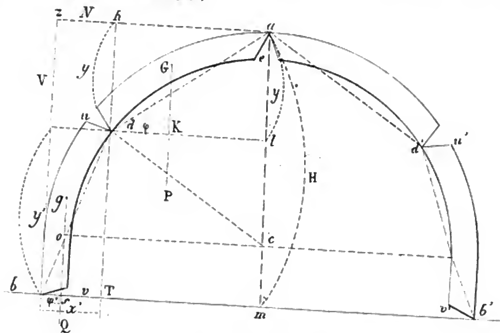
Dans certains cas, au lieu des effets que nous venons de décrire, on remarque que la voûte se fend à la clef et dans les reins, mais sans s'ouvrir et que les piédroits glissent sur leurs bases.

Enfin, il est un dernier cas possible, c'est que le voussoir

inférieur exerce, pour tomber en avant, un effort plus grand que celui exercé par le voussoir supérieur. Alors la voûte se fend comme dans le premier cas, mais en sens contraire. Elle s'ouvre à l'extrados à la clef, à l'intrados dans les reins, et extérieurement à la base des piédroits.

Nous allons examiner successivement ces trois cas.

Soit bd a d'b' la section d'une voûte reposant sur ses piédroits et prête à s'ouvrir à l'intrados, à la clef en e à l'extrados dans les reins en u et u', à la base des piédroits du côté du vide en v et v'



Dans ce moment où l'équilibre va se rompre, si la voûte était exécutée en matériaux incompressibles, les quatre parties dont elle se compose ne s'appuieraient les unes sur les autres qu'en a, en d et en d', et ne reposeraient plus sur le sol qu'en b et b'. Si donc on imagine ces points réunis par des droites et les poids des quatre parties de la voûte appliqués aux points où les verticales passant par leurs centres de gravité rencontrent ces droites, ces quatre lignes sollicitées par ces poids pourront être substituées aux portions de voûte dont nous voulons

déterminer les conditions d'équilibre.

Nous n'en considérerons qu'une tranche égale à l'unité de longueur, parcequ'il est évident que si l'équilibre existe sur une tranche, quelle que petite qu'elle soit, il subsistera sur toute la longueur de la voûte.

1.er Cas. — Affaissement de la voûte par l'effet du renversement des piédroits.

La voûte se trouve ainsi comme composée de quatre parties mobiles autour des arêtes a, d, d', b, b' et peut être considérée comme le système de quatre leviers $ad, db, ad', d'b'$, sur lesquels seraient appliqués les poids des parties des voûtes correspondantes.

Nous appellerons voussoirs chacune des quatre parties de la voûte ainsi décomposée ; nous nommerons P le poids des voussoirs supérieurs, Q celui des voussoirs inférieurs, G et g étant les centres de gravité de ces voussoirs.

$$\text{Nous ferons} \left\{ \begin{array}{l} dK = \varphi, \quad bo = \varphi' \\ al = dh = y, bT = x' \end{array} \right.$$

Pour que, dans le système articulé que nous considérons, il y ait équilibre autour des points a, d, d', b et b', il faut qu'il ne puisse y avoir rotation autour d'aucune de ces articulations et que les points extrêmes b et b' ne puissent pas se déplacer.

Nous remarquons d'abord que les deux parties du système étant symétriques et s'appuyant l'une sur l'autre au point a, on peut supposer la résistance qu'oppose l'une de ces parties au mouvement de l'autre, remplacée par une force horizontale N, dirigée ainsi suivant az. Nous n'aurons plus alors qu'à considérer deux corps en équilibre autour du point b.

Les conditions de cet équilibre seront donc pour qu'il n'y ait pas rotation en d . . . . $Ny = P\varphi$.

pour qu'il n'y ait pas rotation en b . . . . . $NH = P(x'+\varphi) + Q\varphi'$

pour qu'il n'y ait pas translation en b . . . . . . $\begin{cases} N = R_x \\ P + Q = R_y. \end{cases}$

R étant la réaction au point b.

Il ne suffit pas dans les constructions qu'il y ait équilibre il faut qu'il y ait stabilité, par conséquent que le moment des poids soit plus grand que le moment de la puissance qui tend à renverser le voussoir inférieur, du résistant, et que l'on ait :

$$P(x'+\varphi) + Q\varphi' > NH > \frac{P\varphi}{y} H$$

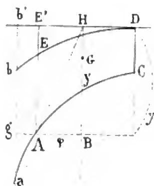
Nous remarquons que le premier membre de cette inégalité est le moment de la voûte entière par rapport au point b. c'est une quantité connue quand la forme de la voûte est déterminée. Le second membre de l'inégalité est au contraire susceptible de variations, puisque $P\varphi$ et y varient avec la position du point d. Mais parmi toutes les valeurs possibles de ce second membre, celle qu'il nous importe de connaître est évidemment celle qui est la plus grande, puisque c'est celle-là qui menacera davantage la solidité de la voûte.

On voit d'après ce qui précède que c'est la recherche de ce maximum qui doit nous occuper avant tout, puisque ce ne sera qu'après avoir déterminé le point où la voûte est la plus faible que nous connaîtrons la force qui tend à renverser la voûte et le point où elle est appliquée.

Nous pouvons, dès l'abord remarquer que ce second terme $\frac{P\varphi}{y}$ ne contient que les quantités relatives au voussoir supérieur, qu'ainsi il est indépendant de la forme et des dimensions des piédroits. Mais nous voyons en même temps qu'il faut, pour obtenir le maximum de cette fonction, connaître la position du joint le plus faible, ou comme on dit, du joint de rupture.

Supposons qu'il soit en A, le voussoir agissant se trouvera

à droite de la verticale AE, et pour le déterminer nous aurons à chercher la position du point A pour lequel l'expression, $\frac{P\varphi}{y}$ soit un maximum; or, on sait que quand une quantité variable atteint son maximum et son minimum, les valeurs infiniment voisines lui sont égales. Soit donc



EACD le voussoir de plus grande poussée dont la surface proportionnelle au poids est P; désignons AB et AE' par φ et par y, comme précédemment. Imaginons que ba soit le joint infiniment voisin de AE nous aurons pour la valeur de $\frac{P\varphi}{y}$ correspondante au voussoir baCD.

$$\frac{P(\varphi + Ag) + AEba \times \frac{Ag}{2}}{y + ag}$$

Mais si nous remarquons que la surface AEba est infiniment petite, que Ag est lui-même infiniment petit, nous en conclurons que le produit $AEba \times Ag$ est tout-à-fait négligeable, et nous aurons pour la valeur de $\frac{P\varphi}{y}$, qui répond au joint ba, $\frac{P(\varphi+Ag)}{y+ag}$ laquelle, dans le cas du maximum, doit être égale à $\frac{P\varphi}{y}$; nous aurons donc:

$$\frac{P\varphi}{y} = \frac{P(\varphi + Ag)}{y + ag}$$

si nous faisons disparaître P. facteur commun, et que nous réduisions au même dénominateur, il vient: $\varphi(y+ag) = y(\varphi + Ag)$ et en réduisant: $\varphi \times ag = y \times Ag$.

$$\text{d'où } \frac{\varphi}{y} = \frac{Ag}{ag}$$

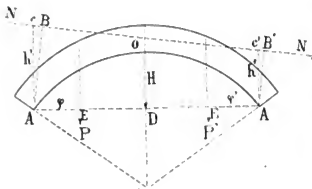
Or, nous voyons que si on élève par le point G centre de gravité de la figure AEDC, une verticale BH nous aurons $AB = \varphi$, $BH = y$. Donc puisque $\frac{\varphi}{y} = \frac{Ag}{ag}$, les deux triangles rectangles aAg et ABH ayant un angle égal compris entre côtés proportionnels, sont semblables, ainsi l'angle HAB = aAg et par suite AH est le prolongement de Aa. Mais la petite ligne Aa qui forme le prolongement de AH est un élément de la

courbe d'intrados, c'est donc une tangente à cette courbe. Ainsi la tangente menée à la courbe d'intrados par le joint de rupture rencontre la direction de la poussée horizontale sur la verticale élevée au centre de gravité du voussoir agissant.

On pourrait donc par une construction graphique, déterminer le joint de rupture en essayant pour plusieurs voussoirs si la condition que nous venons d'indiquer se vérifie. On formerait ainsi une courbe passant par les intersections des tangentes et des verticales élevées au centre de gravité du voussoir agissant. Le point où cette courbe couperait l'horizontale passant à l'extrados déterminerait un point de la tangente passant au point de rupture et par conséquent le point de tangence. Mais cette construction graphique suppose la connaissance d'une suite de valeurs de φ qu'on ne peut obtenir qu'après avoir calculé P, il vaudrait mieux pour plus d'exactitude calculer plusieurs valeurs de $\frac{P\varphi}{y}$ correspondant aux points qui se rapprochent de la position qu'affectent les joints de rupture dans le système de voûte que l'on a adopté et déterminer ainsi le maximum de cette fonction

Nous donnerons plus loin un exemple de la méthode de calcul à suivre pour déterminer le point de rupture d'une voûte en plein cintre.

Ce que nous venons d'exposer suppose que la voûte est uniformément chargée. Il peut arriver qu'il en soit autrement et dès lors il convient de rechercher ce qui se passera quand une des moitiés de la voûte sera plus chargée que l'autre.



Supposons une voûte AOA' est inégalement chargée et P et P' le poids des deux demi-voûtes et de leurs surcharges, la réaction N d'une des parties sur l'autre aura une direction inclinée NON, et si de A et de A' on mène AB et A'B' perpendiculaires à cette direction, on aura

pour la condition d'équilibre de la première moitié de la voûte $N \times AB = P \times \varphi$ et pour la seconde moitié $N \times A'B' = P'\varphi'$ en désignant par φ et φ' les distances AE et A'E'. Mais on voit que les lignes AB et A'B' sont dans le même rapport que les verticales $AC = h$ et $A'c' = h'$, de sorte qu'en divisant les deux équations ci-dessus, terme à terme, on aura :

$$\frac{AB}{A'B} = \frac{h}{h'} = \frac{P\varphi}{P'\varphi'} \text{ d'où l'on conclut } \frac{h}{h+h'} = \frac{P\varphi}{P\varphi+P'\varphi'} \quad (1)$$

Mais $h + h' = 2H$ en désignant DO par H, on tirera donc de (1) $h = \frac{P\varphi H}{P\varphi+P'\varphi'}$. On pourra donc tracer la direction suivant laquelle s'exercera la poussée de la voûte et calculer la stabilité de cette voûte boiteuse comme celle d'une voûte également chargée.

2e Cas – Affaissement de la voûte à la clef et glissement des piédroits sur leurs bases.

Nous avons vu en traitant le premier cas, comment on déterminait le joint de rupture d'une voûte ; nous avons vu en même temps que ce joint était celui pour lequel la poussée horizontale du voussoir agissant était la plus grande. Le glissement de la culée ou du piédroit sur sa base doit être produit par cette même force horizontale ; ainsi les calculs pour la trouver doivent être faits aussi bien dans un cas que dans l'autre.

Quant à déterminer la condition d'équilibre, cela est facile, puisque la résistance n'est due qu'au frottement du piédroit sur sa base, et que ce frottement est produit par la pression, laquelle est égale au poids de la voûte entière et de ses piédroits.

Si donc on appelle f. le coefficient du frottement et M le poids de la voûte entière et de son piédroit, on aura $\frac{P\varphi}{y} = f M$ pour l'équation d'équilibre

3e Cas

3e Cas. — Soulèvement de la voûte à la clef, ouverture à l'intrados à la clef, à l'extrados dans les reins en dehors des piédroits à leur base.

Pour établir l'équilibre dans ce cas, il est évident qu'il faut opérer comme dans le premier cas, seulement les points de rotation sont changés.

Ainsi en nommant λ l'abscisse du centre de gravité du voussoir agissant par rapport à son point de rotation à l'extrados ou AF de la figure ci-contre, et y_1 l'ordonnée CE du point C au dessus de l'horizontale menée par le point A on aura pour les équations d'équilibre :

$$N_1 y_1 = P\lambda_1 \frac{P_1\lambda}{y_1} H = P_1(x_1+\lambda)+Q_1\lambda_1$$
$$N_1 = R_x,\ P_1 + Q_1 = R_y$$

Dans ce cas l'équilibre sera rompu d'autant plus vite que $\frac{P_1\lambda}{y_1}$ sera plus petit, ainsi il faudra en chercher le minimum.

Au reste nous devons observer que le cas de soulèvement d'une voûte à la clef est un cas très exceptionnel qui ne peut se présenter qu'avec une voûte très mince à sa partie supérieure et très lourde sur les reins. Ainsi dans les cas ordinaires on ne prendra pas la peine de faire le calcul que nous venons d'indiquer. Cette circonstance se présente cependant dans les voûtes d'édifices et a donné lieu à ces clefs pendantes que l'on remarque dans les églises gothiques, où elles sont décorées de sculptures très-délicates.

Art. 11. Épaisseur des Piédroits dans le cas d'équilibre statique.

La détermination de l'épaisseur des voûtes ne peut

se faire que lorsqu'on connait la poussée horizontale qui s'exercera à la clef, et qui, se reportant sur les piédroits, tend, soit à les renverser, soit à les faire glisser sur leur base. Pour calculer théoriquement l'épaisseur que devront avoir ces piédroits pour résister au renversement et au glissement, il faut supposer connue cette épaisseur, chercher l'expression du moment de stabilité du piédroit et de la voûte, égaler ce résultat au moment de la poussée horizontale supposée appliquée au point de rupture, et tirer de cette équation la valeur de l'épaisseur du piédroit, laquelle est la seule quantité inconnue. On obtient ainsi l'épaisseur statique pour résister au renversement.

Pour le cas du glissement, on calcule le poids de la culée et de la voûte, on multiplie ce résultat par 0.76 qui est le coefficient du frottement de la pierre sur la pierre, et on égale le résultat ainsi obtenu à la poussée horizontale. Cette équation donne la valeur de l'épaisseur statique du piédroit.

Comme il pourrait arriver que la voûte se rompît en glissant, non pas sur sa fondation, mais sur le plan des naissances, on ne doit compter pour le poids du piédroit que la partie qui est supérieure au poids des naissances. Le résultat ainsi obtenu n'aurait pas besoin d'être augmenté sensiblement parceque l'hypothèse dont on est parti pour l'obtenir est la plus défavorable dans le cas du glissement. Mais il arrive souvent que l'épaisseur statique applicable au cas de renversement est plus considérable que celle trouvée pour le cas du glissement; alors on ne peut plus s'en tenir à cette épaisseur, parceque tout le poids agirait sur une arête et qu'il arriverait, soit la compression du sol s'il n'avait pas une résistance illimitée, soit l'écrasement si le sol de fondation était un rocher très dur. Mais lorsqu'on veut construire une voûte solide, le calcul statique de son état ne peut conduire d'une manière certaine à la détermination des dimensions qu'il convient de lui donner pour qu'elle soit stable

Ainsi les constructeurs qui suivent cette méthode, lorsqu'ils ont obtenu de cette manière, l'épaisseur de la culée, multiplient le chiffre de cette épaisseur théorique par un coefficient qui, pour les uns est de 1,38 pour les autres 1.40, et pour quelques uns 1.90

§12. Méthode graphique pour déterminer la stabilité des voûtes et les dimensions à leur donner.

Considérations générales.

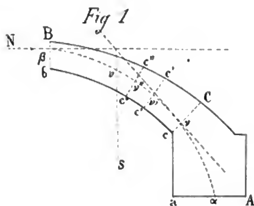
La théorie que nous avons exposée sur la poussée des voûtes et sur la détermination de l'épaisseur de leurs piédroits, exige que l'on connaisse l'épaisseur des voûtes à la clef, et se fonde sur cette hypothèse que la voûte se décompose en quatre parties qui se maintiennent en équilibre autour de leurs arêtes.

Cette méthode irréprochable en théorie est inapplicable en réalité parcequ'il n'est pas exact de supposer tout l'effort concentré sur des arêtes, puisque ces arêtes s'écraseraient, et que l'emploi des coefficients de stabilité n'apprend rien sur les efforts réels auxquels les matériaux de la voûte sont soumis.

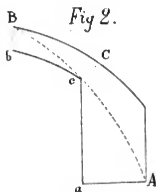
Mr. Méry, Ingénieur des Ponts et Chaussées long-temps attaché au port de Brest, y a trouvé les moyens suffisants pour faire des expériences sur la poussée des voûtes. Éclairé par les résultats de ses essais et par les expériences faites par ses devanciers, il est parvenu à découvrir un procédé très pratique au moyen duquel on parvient sans peine à déterminer les épaisseurs des voûtes cylindriques de toutes les formes et celles de leurs piédroits. Voir l'exposé de sa méthode.

Dans

Dans une voûte en berceau, un joint quelconque cC supporte dans son étendue des pressions inégales d'un point à l'autre, mais toutes ces pressions peuvent être considérées comme ayant une seule résultante p, appliquée en un point v. Le poids S de la voûte est maintenu en équilibre par la réaction horizontale N de la seconde moitié de la voûte et par la réaction p du joint CC appliquée au point où ce joint est rencontré par la résultante du poids S et de la réaction ou poussée horizontale N. Si l'on imagine que pour chaque joint c'C', c"C", on a déterminé des points analogues v'v". on on obtiendra une courbe β, v", v', v qui sera très propre à éclairer sur l'équilibre de la voûte, M. Méry a nommé cette courbe, courbe des pressions.



Si cette courbe, comme dans le croquis ci-contre fig. 2, ne pouvait être tracée qu'en passant au sommet de la voûte en B, pour toucher l'intrados en c et aboutir ensuite à l'angle extérieur du piédroit A, ce serait une preuve que les pressions seraient appliquées en A, C et B, et que la voûte tendrait à s'ouvrir en b, en C et en a. Elle serait alors dans le cas d'équilibre statique, comme nous l'avons supposé §. 10.



Dans la figure 1 la courbe des pressions se rapproche des points B, c, A, mais ne les atteint pas; dans ce cas, elle est utile pour faire connaître les parties faibles de la voûte. Ainsi les points où l'écrasement et la rupture sont à craindre, sont les joints Bb, cC, aA, dans lesquels la courbe des pressions se rapproche le plus de l'extrados ou de l'intrados.

D'un autre coté, si nous examinons un de ces joints cC, puisque la résultante des pressions réparties sur le joint passe en v, la portion cv de ce joint supporte au moins la moitié

de cette pression. Ainsi, pour que la voûte soit solide, il faut que c v soit assez grand pour supporter sans s'écraser, au moins la moitié de la pression. Cette même condition doit être satisfaite pour βB et pour α A.

Quand la pression ne s'exerce pas normalement au plan de joint de deux voussoirs, ces voussoirs tendent à glisser l'un sur l'autre. Pour que le glissement n'ait pas lieu, il faut que le frottement soit plus fort que le rapport $\frac{\cos\varphi}{\sin\varphi}$ (φ étant l'angle que fait la direction de la force avec le plan de contact des deux voussoirs). Le rapport du frottement à la pression, ou le coefficient du frottement est évalué ordinairement à 0,76. La courbe des pressions fait connaître les joints suivant lesquels le glissement est le plus à craindre, et donne le moyen de calculer s'il doit ou non avoir lieu, car à l'inspection seule de la figure, on voit quel est le joint qui est le plus incliné sur la direction de la courbe des pressions.

Tracé de la courbe des pressions.

Nous avons déjà vu que pour qu'une voûte eût de la stabilité, il fallait que son épaisseur et celle de ses piédroits fussent plus considérables que celles qui conviennent à l'état d'équilibre. Dès lors la courbe des pressions peut y prendre une infinité de positions différentes, sans qu'il soit possible de préciser celle qui se réalisera, parcequ'elle dépend du tassement que l'on ne peut prévoir exactement, de la contraction et de la dilatation qui varient avec la température, et aussi parceque la position de cette courbe change suivant les surcharges accidentelles auxquelles la voûte est soumise.

Parmi toutes ces positions, celle qu'il importe de connaître sont celles qui correspondent au maximum de la poussée et à son minimum.

Dans ces deux cas particuliers, la courbe des pressions passe ordinairement par quelques points connus d'avance.

deux suffisent pour la déterminer et la construction peut être faite de la manière suivante :

Soient β et α deux points donnés de la courbe des pressions ; l'un β sur la verticale passant par le milieu de la clef, l'autre α sur le plan des naissances ou sur le joint de rupture, et proposons nous de trouver les intersections de la courbe des pressions avec les joints cC, c'C'.

On calculera d'abord les poids des solides BbCc Bbc'C', Bb Aa, et la position de leurs centres de gravité ; on mènera par β l'horizontale βX et par les centres de gravité les verticales Kg, K'g', K''G ; sur K''G on prendra K''S'' proportionnelle au poids du solide Bb Aa. On joindra K''α et on construira le parallélogramme K''P''RS''. Le coté K''P'' sera proportionnel à la poussée horizontale et la diagonale K''R à la pression sur le joint aA.

Cela fait, à partir des points K et K' nous porterons les longueurs KP, K'P' et nous construirons les parallélogrammes KPrs, K'P'r's' dont nous prolongerons les diagonales jusqu'à la rencontre des joints cC, c'C' ; les points ainsi déterminés seront des points de la courbe des pressions.

Si au lieu de connaître les points α et β de la courbe des pressions, on avait les points ν et α, et si l'on avait comme précédemment calculé les surfaces des voussoirs et déterminé la position de leurs centres de gravité on mènerait par les centres de gravité des portions de voûte bBcC et bBaA dont les poids sont P' et P, les verticales Kg et K''G rencontrant en m et M l'horizontale EA passant par le point α. Soit KP la direction inconnue et l'intensité de la poussée horizontale de la voûte (poussée égale en tous les points de cette voûte) KS et K''S'' les poids des deux portions de voûtes considérées. Si on mène sr et S''R ainsi que Krt et K''Rα, on aura en comparant les triangles

semblables KSr et Kmt.

$$\frac{KS}{Km} = \frac{Sr}{mt} , \frac{K''S''}{K'M} = \frac{S''R}{M\alpha}$$ d'où $KS \times mt = Km \times Sr$ et

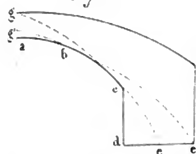
$K''S' \times M\alpha = K'M \times S'R$, mais $Km = K'M$, $Sr = S''R$ donc $KS \times mt = K'S' \times M\alpha$ d'où l'on tirera $mt = \frac{K'S' \times M\alpha}{KS}$

Connaissant mt on tracera la ligne Vt que l'on prolongera jusqu'à la rencontre de la verticale KS en K. Par K on mène l'horizontale KS qui donne la direction de la poussée dont on obtient l'intensité en portant le poids du voussoir $BbCc$ de K en S et menant Sr jusqu'à la rencontre de Kvt en r : Sr sera cette poussée.

Si on a pris au hasard les points α et β, et qu'on les ait mal choisis, on s'en aperçoit bientôt par le tracé qui en résulte, ainsi, par exemple, la courbe sort des limites assignées à la voûte, ou elle conduit à une épaisseur exagérée de piédroits &c. Il est toujours facile de faire une nouvelle hypothèse sur la position des points α et β et de construire une nouvelle courbe en se servant de la plupart des éléments employés pour la première.

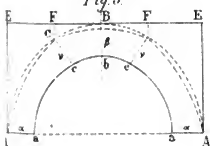
Prenons pour exemple de l'application de ces principes une voûte construite avec des matériaux assez résistants pour ne pas s'écraser en supposant que les pressions s'exercent sur des arêtes. Dans ce cas il est évident que la voûte sera en équilibre si la courbe des pressions se trouve tracée de manière à ne pas dépasser la limite des voussoirs. Si elle sortait de ces voussoirs l'équilibre serait rompu, à moins que la voûte ne fut consolidée par des armatures, ou que la résistance des mortiers ne fut supérieure à l'effort qui tendrait à rompre la stabilité, ce sont de ces cas que nous ne pouvons considérer.

Pour toute forme de voûte, il y a deux cas principaux qui peuvent se présenter quand on cherche la courbe des pressions. Ainsi, dans une voûte en arc de cercle abc avec une hauteur de piédroits cd en prenant pour point de départ de la courbe des pressions le point g' tel que cette courbe soit



soit tangente à l'intrados sans s'abaisser au-dessous, on arrivera à un tracé g'bc' qui descendra le plus bas possible vers la clef et donnera la plus grande épaisseur du piedroit. En prenant au contraire le point de départ au sommet de la clef, et en donnant à cette clef une longueur telle que la courbe des pressions passe en c on arrivera au tracé gce qui conduirait à une moindre épaisseur de piedroit.

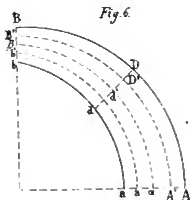
Entre ces deux tracés extrêmes il se trouverait une infinité de courbes de pression différentes qui donneraient pour la poussée des valeurs intermédiaires. Mais elles n'existent que lorsque la voûte a des dimensions plus que suffisantes pour l'équilibre mathématique, car, dans ce dernier cas il n'y a qu'une seule courbe qui, suivant la forme de la voûte et la charge à laquelle elle est soumise, peut rencontrer plusieurs fois la courbe d'extrados, ou alternativement la courbe d'intrados et celle d'extrados.



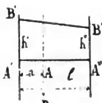
Soit par exemple la voûte représentée figure ci-contre; admettons que les voussoirs sont compris entre les deux courbes aba, ABA et que la maçonnerie des tympans n'a pas de résistance, mais agit seulement par son poids en se divisant suivant les verticales CF au dessus des joints de rupture, on trace d'abord la courbe des pressions $\alpha\nu\beta\nu\alpha$ et supposons qu'elle touche l'extrados ACBCA en trois ou quatre points, mais qu'elle n'atteint pas la courbe d'intrados, on rapprochera les deux courbes d'intrados et d'extrados, en tenant note de leur premier écartement, et on tracera une seconde courbe des pressions, laquelle pourra ne pas atteindre encore la courbe d'intrados. A l'aide de ces deux tentatives on arrivera, par une proportion, à déterminer à très-peu près la courbe d'équilibre qui touchera l'intrados et l'extrados en cinq ou six points. Dans

le plus grand nombre des cas, trois des joints de rupture sont placés comme nous l'avons vu, à la clef et aux naissances, ce qui évite beaucoup de tâtonnements.

Application du tracé de la courbe des pressions à la détermination des dimensions à donner aux voûtes pour assurer leur stabilité.



Lorsque la forme d'une voûte sera donnée, on pourra toujours, par le tracé de la courbe des pressions, déterminer approximativement la poussée horizontale de la voûte. Quand on connaîtra cette force on déterminera pour un joint quelconque l'effort qu'il aura à supporter. Connaissant cet effort, on aura à déterminer pour un joint quelconque à quelle distance la courbe peut s'approcher de l'extrémité D du joint AD (fig. 6) sans que la maçonnerie s'écrase sous la charge. Mais auparavant, nous devons chercher comment la pression se répartit sur la face rectangulaire de contact de deux corps agissant l'un sur l'autre.



Soit A'A'' la face de contact, h' et h'' les raccourcissements par unité de longueur qu'ont éprouvés sur l'unité de surface, les fibres extrêmes de la pièce en A' et en A''. L'effort p' supporté en A' divisé par ce raccourcissement sera égal à E coefficient d'élasticité du corps et on aura $p' = Eh'$. on aura de même en A'', $p' = Eh''$ et si P est la pression totale qui fait presser les deux corps l'un sur l'autre et Ω la face de contact on aura $P = E\Omega\frac{h'+h''}{2}$ si nous supposons que les raccourcissements ou les pressions croissent comme les ordonnées du trapèze B'A'B''A'' — ou que ce trapèze nous représente la pression totale supportée par la face de contact sur l'unité d'épaisseur. Dès lors la pression totale P passera par le centre de gravité du trapèze.

Cela posé, si nous cherchons la position du point A où passe la résultante de toutes les pressions P, nous aurons en prenant par rapport à B'A' les moments des deux triangles dans lesquels se décompose le trapèze à

$$a = \frac{\frac{lh'}{2}\frac{l}{3} + \frac{lh''}{2}\times\frac{2}{3}l}{\frac{(h'+h'')}{2}l} \qquad \text{d'où}$$

d'où $a(h'+h'') = \frac{l}{3}(h'+2h'')$ et en divisant par h''

$$a\left(\frac{h'}{h''}+1\right) = \frac{l}{3}\left(\frac{h'}{h''}+2\right) \text{ d'où } \frac{h'}{h''} = \frac{3a-2l}{l-3a} \text{ et par suite}$$

$$\frac{h'}{h'+h''} = \frac{3a-2l}{-l} = 2-\frac{3a}{l} \quad \text{et} \quad \frac{h''}{h'+h''} = \frac{l-3a}{-l} = \frac{3a}{l}-1$$

Mais si nous divisons successivement les valeurs de p' et de p'' trouvées plus haut par celle de P nous aurons:

$$\frac{p'}{P} = \frac{2h'}{(h'+h'')\Omega}, \quad \frac{p''}{P} = \frac{2h''}{(h'+h'')\Omega}$$

et en remplaçant les fractions $\frac{h'}{h'+h''}$ et $\frac{h''}{h'+h''}$ par leurs valeurs

$p' = \frac{2P}{\Omega}\left(2-\frac{3a}{l}\right)$ et $p'' = \frac{2P}{\Omega}\left(\frac{3a}{l}-1\right)$ on connait la valeur de a et celle de Ω; on pourra donc obtenir la pression maxima et la pression minima supportée par les corps pressés.

Si $a = \frac{l}{3}$ et que l'on considère les corps sur une épaisseur égale b on aura $\Omega = 3ab$. Par conséquent les fibres les plus fatiguées supporteront par unité de surface une pression $p' = \frac{2P}{3ab}$ et $p'' = 0$. On voit en effet que la pression est alors représentée par un triangle.

Pour une valeur de $a < \frac{l}{3}$, on aurait p' négatif et p'' nul pour une valeur de $l = 3a$.

Cela posé, si nous revenons à la figure 6 nous supposerons qu'il n'y a pas de pression négative sur les joints et que la courbe des pressions passe au tiers des joints à l'extrados à la clef et à l'intrados au joint de rupture et nous prendrons sur chaque joint tel que dD des longueurs égales DD', dd' calculées de manière que chacune des surfaces DD' et dd' puisse supporter les $\frac{2}{3}$ de la pression totale à laquelle le joint sera exposé. On tracera de cette manière deux courbes $B'D'A$ et $b'd'a'$ destinées à marquer les limites que la courbe des pressions ne doit pas franchir.

Ainsi nous imaginerons toujours une voûte divisée en trois zônes ; les deux extrêmes auront une largeur telle que les matériaux employés à la construction des voussoirs ne supporteront sur cette largeur que le $\frac{1}{10}$ de leur résistance absolue, et la zône intermédiaire aura strictement la largeur suffisante pour que la courbe des pressions ne s'en écarte jamais, quelles que soient les surcharges auxquelles la voûte serait soumise.

De là résulte que la question de stabilité des voûtes se trouve ramenée à celle de leur équilibre mathématique. Ainsi il n'y aura qu'une courbe possible dans la zône b'B'a'A' quand la voûte ne devra pas avoir de surcharge, et s'il y a surcharge on donnera à la zône un peu plus de largeur pour que les deux positions extrêmes de la courbe des pressions puissent s'y trouver renfermées.

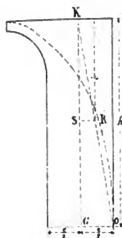
Quant à la rupture des voûtes par glissement, nous avons vu qu'elle n'aurait lieu que pour les joints où le rapport $\frac{\cos\varphi}{\sin\varphi} = 0{,}76$.

Cette observation sur le glissement est particulièrement applicable aux voûtes en arc de cercle. On sera assuré de leur stabilité si les plans de joint sont normaux à la courbe des pressions.

Si l'on veut déterminer l'épaisseur limite à assigner aux piédroits pour une hauteur très grande, nous remarquerons que si le piédroit est infini, la verticale menée par le centre de gravité de la demi-voûte passera au milieu des piédroits puisque le poids de la voûte pourra être négligé par rapport au poids d'un piédroit très haut. Ainsi en nous rappelant la construction de la courbe des pressions et appelant e l'épaisseur du piédroit et h sa hauteur, nous aurons :

(figure

(figure ci-contre) en appelant π la poussée horizontale



$\frac{GO}{KG} = \frac{SR}{KS}$ ou $\frac{\frac{e}{2}}{h} = \frac{\pi}{h \times e \times D}$ en appelant Π la poussée de la voûte et D le poids du mètre cube de maçonnerie de là on tire $\frac{e^2}{2} \times h \times D = \Pi h$, et finalement $e = \sqrt{\frac{2\Pi}{D}}$

§. 13. – Application pratique des Théories précédentes

Lorsqu'on veut déterminer les dimensions à donner à une voûte, il faut, comme nous l'avons vu, calculer le poids et le centre de gravité des différentes parties de cette voûte et connaître la résistance des matériaux que l'on devra employer.

L'expérience directe faite sur les matériaux apprendra sous quelle charge ils s'écrasent, et, en se tenant dans les limites du huitième ou dixième de celle qui produirait l'écrasement, on ne sera exposé à aucun danger, si la maçonnerie est parfaitement exécutée.

Mais pour calculer le poids des voussoirs et de leur surcharge en remblai, en chaussée, en poids d'épreuve de 4 à 500^k par mètre carré, il faut connaître leur épaisseur, et c'est précisément cette épaisseur que l'on cherche. Il faudra donc faire une première hypothèse en partant de la règle empyrique de Perronet. On aura l'épaisseur à la clef e en fonction de l'ouverture l en employant la formule suivante : $e = 0,0347\,l + 0,325$. A défaut d'expériences sur la résistance des matériaux à employer, on pourra se guider d'après les données du tableau placé à la suite de l'art. 1er du chapitre 2 en ayant soin de ne pas dépasser le $\frac{1}{10}$ de la résistance absolue portée dans ce tableau.

Le tableau graphique et les calculs ci-joints font connaître la marche à suivre, lorsqu'on applique la méthode précédente à la

détermination des dimensions à donner à une voûte (Voir Pl. XVIII)

Chapitre 2

Détermination de l'épaisseur à donner aux murs de soutènement

§ 1 Poussée exercée par des terres contre le parement d'un mur de soutènement

Lorsqu'on a déposé des terres derrière un mur destiné à les soutenir à la hauteur de ce mur, ces terres qui, abandonnées à elles mêmes s'ébouleraient suivant un angle dépendant de la nature de la terre, exercent nécessairement, sur la face du mur qui leur est opposée, une certaine pression que l'on appelle la poussée. L'intensité de cette force et son point d'application doivent être connus lorsqu'on veut calculer les dimensions et la forme à donner au mur pour qu'il résiste à l'effort qui le sollicite, ou au renversement, ou au glissement sur sa base.

Nous admettons, pour arriver à déterminer la poussée, que le prisme de terre qui se détache du massif pour agir sur le mur s'en détache suivant un plan et nous chercherons parmi tous les prismes qui peuvent se former dans le massif de terre que le mur supporte, celui qui exercera la plus grande poussée.

Mais nous ne traiterons pas cette question dans sa généralité, nous nous bornerons à traiter un cas particulier que nous simplifierons encore, en supposant que le prisme de terre ne frotte pas contre le parement vertical du mur.

Soit AB le parement du mur, et AC le talus suivant lequel les terres qui sont élevées derrière le mur commenceraient à s'ébouler si elles n'étaient soutenues.

Admettons, de plus, qu'il se détache du massif de remblai un prisme de terre quelconque BAD qui, glissant suivant un plan incliné AD, exercerait une poussée contre le mur AB, et cherchons quel sera parmi tous les prismes qui peuvent se former ainsi, celui qui exercera contre le mur la plus grande poussée. Appelons:

Q, la réaction qu'oppose le mur à cette poussée dans une direction normale au mur, ou la poussée elle-même;

N, la réaction du plan AD

P, le poids du prisme;

φ l'angle d'éboulement des terres avec la verticale;

α l'angle inconnu formé avec la verticale par le plan d'éboulement du prisme de plus grande poussée.

f le coefficient du frottement égal à $\frac{\cos\varphi}{\sin\varphi} = \frac{1}{tg\,\varphi}$;

h la hauteur AB du parement du mur. Au moment où le mouvement se produit, il peut se développer entre le mur et le prisme un frottement dont l'effet tend à arrêter la marche du prisme; nous ne considérerons pas cet effet parceque les murs sont généralement renversés, après les pluies, quand le sol est devenu plus lourd par la pénétration de l'eau, et qu'alors il peut s'être introduit entre les deux surfaces de l'eau qui a rendu le frottement sans importance.

D'après ces données, le prisme ABD, sur 1m de longueur aura pour volume $\frac{h^2 tg\alpha}{2}$ et en appelant π le poids du mètre cube de terre, le prisme pèsera:

$$\frac{\pi\; h^2\; tg\,\alpha}{2} = P.$$

Si nous supposons que les forces P et Q agissent en un même point D, dans le cas d'équilibre, il faudra que leurs composantes, dans le sens du plan AD et perpendiculairement à ce plan, soient nulles.

Nous aurons:

Dans le plan AD

$$P\cos\alpha - Q\sin\alpha - fN = 0$$

Perpendiculairement au plan AD

$$N - Q\cos\alpha - P\sin\alpha = 0$$

Eliminant N nous aurons:

$$P(\cos\alpha - f\sin\alpha) - Q(\sin\alpha + f\cos\alpha) = 0$$

d'où $$Q = \frac{P(\cos\alpha + f\sin\alpha)}{\sin\alpha + f\cos\alpha}$$

Divisant par $\cos\alpha$, il vient:

$$Q = \frac{P(1 - f tg\alpha)}{tg\alpha + f} \qquad \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots (1)$$

remplaçant P par sa valeur $\frac{\pi h^2 tg\alpha}{2}$ et faisant $tg\alpha = x$ la formule (1) deviendra:

$$Q = \frac{\pi h^2 (1 - fx)}{2(x + f)} x \ldots\ldots\ldots (2)$$

si pour obtenir le maximum de la poussée Q nous égalons à 0 le coefficient différentiel du second membre, nous aurons:

$$(1 - 2fx)(x + f) - (x - fx^2) = 0$$

effectuant les calculs et réduisant, il vient:

$$-x^2 - 2fx + 1 = 0 \text{ d'où } x = -f \pm \sqrt{f^2 + 1}$$

remplaçant f par sa valeur $\frac{1}{tg\varphi}$ et x par $tg\alpha$, on a:

$$tg\alpha = -\frac{1}{tg\varphi} \pm \sqrt{\frac{1 + tg^2\varphi}{tg^2\varphi}}$$

Comme le second membre est la valeur de la tangente de $\frac{\varphi}{2}$

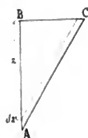
on voit que $\alpha = \frac{\varphi}{2}$, c'est à dire que le prisme de plus grande poussée est celui qui correspond à l'angle moitié de l'angle d'éboulement.

Prenons les valeurs de $f = \frac{1}{tg\varphi}$ et de $x = tang\frac{\varphi}{2}$ φ et substituons dans l'équation (2) nous aurons :

$$Q = \frac{\pi' h^2 (1 - \frac{tg\frac{\varphi}{2}}{tg\varphi})}{2(tg\frac{\varphi}{2} + \frac{1}{tg\varphi})} = \frac{\pi' h^2}{2}\left(\frac{tg\varphi - tg\frac{\varphi}{2}}{tg\varphi . tg\frac{\varphi}{2} + 1}\right) \dots\dots\dots (3)$$

mais l'expression entre parenthèse est la valeur de $tg(\varphi - \frac{\varphi}{2})$ ou de $tg\frac{\varphi}{2}$, de sorte qu'en faisant $tg\frac{\varphi}{2} = t$, (3) se réduit à

$$Q = \frac{\pi' h^2 t^2}{2} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$



Pour obtenir le point d'application de la poussée, nous observons que pour une charge de terre z agissant sur un mur la poussée sera représentée par $\pi' \frac{t^2 z^2}{2}$, pour une charge $z + dz$ elle deviendra :

$$\pi' \frac{t^2}{2}(z^2 + 2z\,dz + dz^2)$$

et si l'on retranche la première expression de la seconde on obtiendra pour la poussée correspondante à dz :

$$\frac{\pi' t^2}{2}(2z\,dz + dz^2) \text{ qui se réduira à } \pi' t^2 \times z\,dz,$$

si nous observons que dz^2 doit être négligé à coté de $2z\,dz$. Le bras de levier de cette poussée par rapport à B est z, ainsi son moment sera $\pi' t^2 z^2 dz$. Si nous intégrons depuis $z = 0$ jusqu'à $z = h$, nous aurons pour le moment de la poussée totale : $\frac{\pi' t^2 h^3}{3}$. Divisant par la poussée $\frac{\pi' t^2 h^2}{2}$, nous obtiendrons pour la distance du point d'application de la poussée totale au point B, $\frac{2}{3}h$: Ainsi la poussée a son centre d'action aux $\frac{2}{3}$ de la hauteur du mur de soutènement mesurée à partir du sommet du terre plein

Dans les cours de mécanique, on donne le moyen de calculer

la poussée des terres dans tous les cas qui peuvent se présenter et en ayant égard au frottement des terres contre le parement du mur. Mais comme le cas le plus ordinaire est celui d'un terreplein horizontal, et que le frottement des terres contre le mur tend à diminuer la poussée, on peut, en général se contenter de la formule (4)

Pour appliquer cette formule, ou d'autres plus complètes, il faut connaître les talus d'éboulement du terrain qui pressera le mur ou qui en soutiendra la pression. Si on n'avait pas la possibilité de faire des expériences pour déterminer l'angle d'éboulement, on pourrait se guider d'après les données suivantes, où se trouvent aussi les poids des terrains

Poids du mètre cube de	Terre végétale	1400 K
	id franche	1500
	id argileuse	1600
	id glaise	1900
	Sable terreux	1700
	Maçonnerie de pierres calcaires	1700 à 2300
	id ... id ... de granit	2500
	id ... id ... de basalte	2600

Le talus de la terre ordinaire sèche et pulvérulente est de 46°50'
id .... id .... humectée .... 54.
id .... du sable .... 69.

Poids produisant l'écrasement par centimètre carré.

Basalte d'Auvergne	2077 K
Lave du Vésuve	635
Granit des Vosges	616
Pierre de Fourneaux, près Saumur	437
Grès très dur	812
Liais de Bagneux très dur	424
Roche de Poissy	300
Vergelé de St Leu tendre se débitant à la scie	60

Pierre de Conflans . . . . 44 k.
Lambourde de Gentilly se débitant à la scie à dents 44
Lambourde de Montesson se débitant id . . . . id. 20
Mortier très bon de chaux hydraulique 56
Mortier médiocre 5

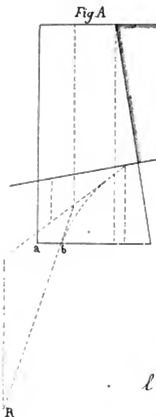
Pour appliquer ces chiffres qui donnent la résistance absolue des matériaux, il faut prendre pour R le dixième de cette résistance

§. 2. Détermination des dimensions à donner à un mur de soutènement lorsqu'on connait la poussée des terres qu'il est destiné à supporter.

Lorsqu'on a calculé la poussée que les terres exerceront sur un mur à construire, on peut déterminer l'épaisseur statique à donner à ce mur en égalant le moment de la poussée et celui du poids du mur pris l'un et l'autre par rapport à l'arête inférieure de la fondation, du côté du parement extérieur du mur. On obtient ainsi l'épaisseur qui conviendrait pour que le mur fut en équilibre avec la poussée, autour de l'arête extérieure de sa fondation ; mais cette égalité est impossible avec des matériaux et des sols compressibles il faut nécessairement augmenter les dimensions ainsi obtenues, et il faut les augmenter d'autant plus que le sol sur lequel on s'établit est plus compressible. Car, de même que dans les voûtes, la poussée reporte et accumule toute la pression près de l'arête de rotation et tend par conséquent à y occasionner un tassement ou un écrasement. Si un tassement s'y produit, le centre de gravité du mur s'avance, par conséquent, l'effort sur le sol; de sorte que, par une marche progressive, le mur une fois avancé finit presque toujours par être renversé.

D'après ces considérations, quand un mur doit être établi sur un sol peu résistant, il convient de donner à ce mur une forme telle que l'équilibre ait lieu autour du point milieu de la

base du mur même, afin que la pression résultant de l'action combinée du poids du mur et de la poussée ait pour effet de produire un tassement uniforme. C'est ce qu'on obtient en donnant beaucoup de fruit au parement vu du mur.



Pour apprécier, en général, l'augmentation d'épaisseur à donner à un mur de soutènement au delà de l'épaisseur statique, j'ai imaginé de tracer sur le profil du mur la courbe des pressions comme on le fait pour les voûtes; on voit ainsi où cette courbe vient couper la fondation, et sous quel angle elle la coupe. Dans le cas de renversement on calcule la surépaisseur, de manière que la partie ab de la fondation qui se trouve en avant de la résultante du poids du mur et de poussée puisse supporter sans s'affaisser ou s'écraser l'effort des 2/3 de la charge.

La courbe se détermine en divisant le mur en tranches verticales triangulaires ou rectangulaires, de manière à éviter la recherche des centres de gravité des figures polygonales et en composant la poussée des terres ou de l'eau avec le poids de la première tranche; cette première résultante se compose elle-même avec le poids de la seconde tranche et ainsi de suite. (Voir fig. A)

Lorsqu'un mur doit être établi sur un sol qui nécessite une fondation coûteuse, au lieu de donner au mur une base rectangulaire d'une épaisseur uniforme, quelquefois on établit de distance en distance des contreforts, a, b, c, (figure ci-contre). Les contreforts s'ils sont parfaitement reliés avec la masse du mur, tendent à reculer beaucoup le centre de gravité de ce mur, et par conséquent à lui donner de la stabilité. Ils ont, en outre, pour effet de rompre le prisme de plus grande poussée, mais pour atteindre ce double but, il faut qu'ils soient parfaitement



reliés au mur, car s'ils n'étaient que plaqués derrière le mur, ils n'auraient d'autre effet que de rompre le prisme de plus grande poussée et n'ajouteraient, pour ainsi dire à la solidité qu'en diminuant l'effort de ce prisme, qui, rompu au droit de chaque contrefort, n'agirait que dans l'intervalle qui les sépare.

Dans le cas de liaison complète, on détermine l'épaisseur du mur en calculant le centre de gravité d'une portion de ce mur comprenant un contrefort et l'intervalle entre deux contreforts consécutifs et cherchant la résultante de ce poids et de la poussée des terres.

Les contreforts isolés, n'ayant pour objet que de rompre le prisme de plus grande poussée, sont ordinairement employés dans les lieux où la pierre est très-abondante, et s'exécutent en pierre sèche. C'est ce qui a été fait judicieusement dans diverses circonstances sur le chemin de St Germain où l'on avait beaucoup de mauvais moellons gélifs provenant des déblais et ne pouvant servir qu'à faire des remblais. On en tirait un très bon parti en les employant en contreforts abrités de la gelée.

Souvent on ne se borne pas à élever des contreforts, on les réunit par des voûtes en décharge. Gauthey rapporte, dans son traité de la construction des ponts, qu'il a construit à Châlons sur Saône, un mur de quai de 5 à 6m de hauteur auquel il a donné 0m 65 d'épaisseur au sommet et 1m 15 à la base avec $\frac{1}{12}$ de fruit sur le parement vu, et qu'il a renforcé de contreforts de 1m d'épaisseur et 1m de saillie, distants les uns des autres de 5m 30 de milieu en milieu et sur lesquels il a établis trois étages de voûtes en décharge de 1m 60 de hauteur sous clef. Par cette disposition on a économisé un tiers de la maçonnerie. Il importe de relier les contreforts au masque par le moyen de tirants en fer avec clef. Peut-être y aurait il avantage à faire les contreforts rapprochés et moins épais, et à construire les voûtes en béton moulé sur le remblai.

Dans les quais de Paris, on a adopté une disposition analogue. On a attaché au mur du quai des contreforts distants de 6m les uns des autres, ayant 2m20 de longueur et 1m20 à 1m50 de largeur. Ils supportent des trottoirs qui ont 3m et un parapet de 0m50, mais on ne les a reliés que par une seule voûte placée à la partie supérieure. Cette disposition exige plus de maçonnerie que celle suivie par M. Gauthey. Un motif indépendant de l'économie aurait dû engager à adopter ce système, c'est la facilité qu'il présente d'établir les trottoirs sur les voûtes en décharge et de les établir solidement. Sur plusieurs quais de Paris, construits dans un autre système, il y a eu longtemps des tassements dans les terres rapportées derrière les murs; de sorte que si l'on y eût établi des trottoirs, ils auraient été dégradés pendant un grand nombre d'années par les effets du tassement.

Pour tirer le meilleur parti des contreforts et des voûtes en décharge nous avons employé une disposition beaucoup plus économique que celles qui viennent d'être décrites.

Les contreforts sont rapprochés à 3m d'axe en axe et disposés comme l'indiquent les fig. 3.4 et 5 de la planche XIX. Dans ce système, les contreforts sont épaissis à leur jonction avec le masque auquel ils sont en outre reliés au moyen de tirants représentés figures 1 et 2, et sont réunis par deux étages de voûtes. On a représenté sur la planche les calculs auxquels donne lieu l'application de cette méthode, pour déterminer la position des centres de gravité du mur, des contreforts, des voûtes et de la terre qu'elles supportent.

Dans l'exemple choisi, l'épaisseur réduite de la maçonnerie ne serait, si elle était uniformément répartie que 1m10 pour 7m60 de hauteur de mur, à peu près le 1/7. Un mur construit d'après ces principes en 1846 n'a jamais éprouvé le moindre mouvement.

Chapitre 3.

De la fondation des Ponts. Murs de quai et ouvrages analogues.

Article 1er _ Considérations générales.

Les terrains sur lesquels on peut avoir à fonder un pont et les ouvrages accessoires qui s'y rattachent, peuvent être divisés en trois catégories :

1°. Incompressibles et inaffouillables. (Rocher, Tuf. enrochements naturels.

2°. Incompressibles et affouillables. (Sable, gravier, cailloux, argile compacte, certaines roches)

3°. Compressibles et affouillables. (Vase, tourbe, terre végétale)

La nature du terrain doit être connue, non seulement à sa surface, mais jusqu'à une profondeur suffisante pour qu'on soit assuré que l'ouvrage qu'on se propose d'exécuter sera solidement établi. Cette reconnaissance du sol se fait avec des sondes employées au forage des puits artésiens. Par cette raison nous n'entrerons dans aucun détail à ce sujet. Nous recommanderons seulement de s'assurer que la cuillère ramène bien les matières provenant du trou de sonde.

Les fondations sur le rocher s'exécutent directement sur le sol sans autre précaution que de le déraser à peu près horizontalement ou par retraites horizontales, quand la construction n'est soumise qu'à des forces agissant verticalement, ou en disposant la surface du sol arrivé avec une inclinaison générale dans le sens opposé à la poussée à laquelle la construction

peut être exposée afin que la construction ne tende pas à glisser sur sa base.

Celle sur un sol incompressible et affouillable se font ou peuvent se faire aussi directement sur le sol, mais il faut pour cela ou que ce sol soit préservé des affouillements par des ouvrages défensifs, ou que la construction soit descendue à un niveau assez considérable pour que les affouillements ne puissent pas l'atteindre. On peut remplacer la partie inférieure des fondations en maçonnerie en faisant reposer l'ouvrage sur des pieux, mais il faut, ou que ces pieux soient garantis des affouillements ou que la limite des affouillements possibles ne puisse pas les déraciner.

Enfin, sur un sol compressible et affouillable il faut nécessairement créer une base incompressible et inaffouillable pour recevoir les fondations.

Dans ces diverses circonstances, les fondations peuvent être exécutées, soit au dessus de l'eau, soit au dessous de son niveau. Dans ce dernier cas, de nouvelles difficultés viennent se joindre à celles que cause la nature du sol, et c'est le cas ordinaire dans la fondation des Ponts.

Nous allons successivement passer en revue les divers modes de fondation applicables à chacun de ces cas, et nous suivrons l'ordre que nous avons établi.

Article 2. _ Fondation sur le rocher nu.

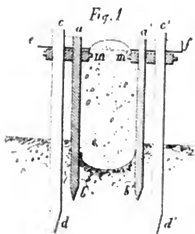
Comme on l'a vu, cette fondation ne peut offrir de difficulté que quand la surface du rocher est au-dessous du niveau de l'eau. Deux moyens sont employés pour fonder dans ce cas; l'un consiste à entourer de batardeaux l'emplacement de l'ouvrage à construire. Dans le second on emploie une caisse sans fond.

§.1. Batardeaux.

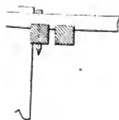
Si la profondeur de l'eau est peu considérable, on peut se

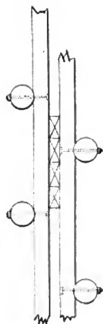
borner à faire des batardeaux formés d'un simple bourrelet en terre argileuse, que l'on pétrit avec les pieds ou que l'on pilonne si la saison est froide. Sur les rivières torrentielles on peut profiter de la pente considérable qu'elles présentent pour isoler une partie de l'emplacement du pont, du surplus du lit au moyen d'un bourrelet longitudinal prolongé assez loin en aval, pour permettre de dessécher cet emplacement au moyen d'un fossé que l'on creuse depuis là jusqu'à une distance suffisante en aval. Ce moyen a été employé pour la fondation d'un pont sur l'Ergue, département de l'Hérault, d'un pont sur le Célé dans le Lot et ailleurs.

Quand la profondeur de l'eau est considérable et la pente faible, ce moyen exceptionnel d'assèchement est impraticable; alors on est obligé de construire des batardeaux qui aient une solidité suffisante pour résister, et à la poussée de l'eau et à la corrosion.



Dans ce cas ils sont formés, lorsque le sol est pénétrable par les pieux d'un coffre sans fond, ouvert par le haut et rempli de terre, de sable fin, ou de maçonnerie. Ce coffre, qui renferme le batardeau (fig 1) est formé de deux parois parallèles en planches a b, a'b' maintenues à leurs têtes par des moises doubles m, m', fixées par des boulons à des pieux c d, c'd', battus de distance en distance (1m50 à 2m) en dehors du batardeau et reliées entre elles de deux en deux pieux, par des liernes simples e f, assemblées avec entailles sur les moises et chevillées sur les pieux (voir le détail figure 2). On ne place les liernes qu'après avoir dragué dans les batardeaux. Ce dragage a pour but d'enlever le gravier qui livrerait passage à l'eau. On relie les deux parois pour que la pression de la terre ne les écarte pas. Quelquefois on maintient les moises par des pieux

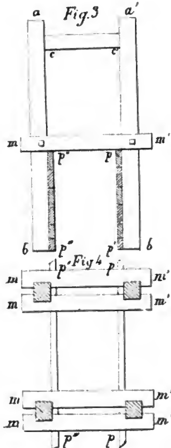




battus, l'un d'un côté, l'autre de l'autre côté de la ligne de palplanches, par ce moyen les deux moises ne sont pas reliées entre elles, elles présentent leur ouverture à la pose des palplanches sans qu'aucun boulon vienne gêner leur mise en place entre les moises.

Quand on emploie pour pieux des bois équarris, ces pieux sont placés dans la ligne des palplanches et en tiennent lieu. Ce moyen est préférable au premier

Quand le travail doit être fait sur un fond de rocher, il arrive souvent que la pointe des pieux, quoique armée d'un sabot en fer ne peut pas pénétrer dans ce rocher et que, par conséquent, le batardeau ne peut pas s'enraciner dans le sol. Alors on adopte une des trois dispositions suivantes :



1ère Disposition. — On construit plusieurs fermes en charpente composées chacune de deux montants ab, a'b' (fig 3), reliées à fleur d'eau par des moises doubles m, m' (fig 3 et 4) et à 1m ou 1m50 au dessus de l'eau par une entretoise cc' (fig. 3). Les fermes ainsi disposées sont placées à 1m50 ou 2m les unes des autres et servent à soutenir des panneaux en planches pp', p'p" qui sont placés horizontalement et s'appuient intérieurement contre les montants. Les moises m, m' empêchent l'écartement des montants, l'entretoise cc' empêche leur resserrement par le haut, de façon que l'on peut faire un remblai entre les deux parois en planches, sans craindre que le batardeau s'ouvre du pied.

2e Disposition. — Au lieu d'empêcher l'écartement du batardeau par le bas, au moyen des entretoises placées au dessus du niveau de l'eau, on relie quelquefois des montants entre eux par des tirants en fer ou en bois ; mais ces tirants doivent nécessaire-

-ment être placés au pied des montants, sans quoi ils empêcheraient de descendre les panneaux de madriers, et placés ainsi au bas des montants, ils peuvent servir de conduite aux filtrations, à cause de la difficulté d'empêcher qu'il ne reste du vide autour des barres de fer et surtout autour des pièces de bois quand les tirants sont en bois. Pour prévenir ces vides, il faut faire ces tirants en fer plat, les clouer sur le pied des montants et les tordre ensuite pour qu'ils se présentent de champ. Si on les laissait à plat, il resterait nécessairement du vide dessous, et l'eau suivant cette voie détruirait le batardeau.

3e Disposition. — Enfin, la troisième méthode consiste à forer le rocher pour former les alvéoles des pieux à l'aide desquels on construit la carcasse du batardeau; alors pour maintenir le pied des palplanches, on fait descendre le long des pieux des moises embrassantes.

Pour rendre ces coffres imperméables, il faut les remblayer.

Ces remblais se font ordinairement en terre glaise onctueuse que l'on pétrit d'avance et que l'on comprime avec le plus grand soin. Quelquefois on les exécute en béton (Maçonnerie formée de pierres cassées et de mortier). C'est une invention nouvelle qui n'a pas encore été employée dans beaucoup de localités; mais qui aura plus tard de nombreuses applications. Nous reviendrons sur ce sujet, lorsqu'il s'agira des écluses.

Enfin on se sert, à défaut de glaise, de sable fin et bien pur. Ce terrain est aussi imperméable que la terre, mais si par hasard une source se trouve sous le batardeau et qu'elle puisse se faire jour à la jonction du sol et du remblai, tout l'ouvrage est bientôt emporté. Il faut aussi dans ce cas que le batardeau soit fort épais et que les parois latérales soient parfaitement étanches parceque le sable coule.

Dans tous les cas, il faut que les batardeaux soient assez solides pour résister à la poussée de l'eau et pour cela on est-

dans l'usage de leur donner une épaisseur égale à la hauteur de l'eau qu'ils doivent avoir à soutenir.

Dans quelques circonstances on a exécuté des batardeaux avec de simples parois en charpente, reliées entre elles par des armatures et rendues étanches au moyen de toiles goudronnées appliquées extérieurement sur les parois et s'étendant à 0m.50 ou 0m.60 sur le rocher et chargées là de glaise ou de sacs à terre.

Nous ne parlons pas des moyens d'épuisement; nous y reviendrons plus tard.

§. 2. — Caisse sans fond.

Lorsque le rocher se trouve à une profondeur de plus de 1m.50 à 2m. au dessous du niveau de l'eau, on renonce ordinairement à fonder par épuisement et on a recours à une caisse sans fond. Cette caisse est étanche ou non et présente sur toutes ses faces un fruit de 0.178.

Caisse non étanche. — La Caisse non étanche s'emploie lorsque la surface du rocher a pu être mise à découvert. Elle est formée de plusieurs ceintures de moises doubles qui entourent tout l'espace que doit occuper la fondation. Ces moises PLXX sont indiquées (fig. 1, 3 et 5) par les lettres a.

Dans chaque ceinture, elles sont séparées par un intervalle de 0m.08 à 0m.10, dans lequel on place des planches verticales destinées à former l'enceinte de la caisse. Comme il importe que ces planches reposent exactement sur le fond de la rivière on ne les met en place qu'après l'échouement de la carcasse de la caisse dans la position qu'elle doit occuper. Cette carcasse se construit quelquefois au dessus de l'emplacement qu'elle est destinée à occuper, de façon qu'avant de poser une planche, on fait descendre à la place qu'elle devra occuper, une tringle verticale avec laquelle on mesure ainsi la longueur

que chaque planche doit avoir.

Quoique les planches s'élèvent jusqu'à la partie supérieure de la caisse, assez haute elle-même pour surmonter les eaux moyennes, on ferme par des planches horizontales jointives et calfatées l'espace compris entre les deux ceintures supérieures des cours de moises.

On peut construire la caisse soit au dessus de l'emplacement qu'elle doit occuper, soit sur un appontement soutenu au moyen de deux bateaux reliés entre eux par de longues pièces de bois reposant sur leurs bords.

Dans le premier cas on construit préalablement un échafaud autour de l'emplacement de la pile, et c'est sur cet échafaud que reposent les semelles qui servent à soutenir la caisse pendant le levage des pièces de charpente. Pour l'immerger, on la soulève au moyen de cries en nombre suffisant, puis quand les semelles sont enlevées, on la descend progressivement jusqu'à son immersion complète.

Quand la caisse est construite sur un appontement flottant on peut l'amener après sa construction au dessus de son emplacement et la mettre à l'eau en la soulevant d'abord et la descendant ensuite au moyen de treuils disposés comme l'indiquent les fig. 1. 2. 7 et 8, et montés sur les bateaux qu'on charge sur le bord opposé à la caisse avec du gravier en volume suffisant pour maintenir les bateaux dans une position horizontale.

Quel que soit le moyen qu'on juge à propos d'employer, il faut prendre avant l'échouement les dispositions nécessaires pour que le caisson descende verticalement.

Article 3. _ Fondation sur le rocher recouvert de gravier dans les rivières torrentielles

Lorsque le gravier ne peut être dragué avant l'immersion de la caisse, on est obligé de la faire avec parois

étanches. C'est le parti que MM. Baudemoulin et Odemayer ont pris pour les fondations du Pont de Port-de-pile sur la Creuse; les caisses que l'on y a employées étaient formées comme la caisse non étanche de la Vienne que nous venons de décrire, d'une carcasse en charpente composée de moises horizontales, de poteaux et de contre-vents inclinés; mais ses parois au lieu d'être faites en palplanches, ont été revêtues extérieurement de planches horizontales jointives et calfatées avec soin. (fig 1,2,3,4,5 et 6. Pl XX)

La caisse étant immergée sur la couche de gravier qui recouvrait le rocher, on la fait descendre en enlevant par épuisement le gravier renfermé dans l'intérieur, et en étanchant les filtrations sur les parois au moyen de sacs remplis de glaise amollie qu'on déposait extérieurement au pied des parois.

Lorsque les bords de la caisse ont été appuyés sur l'argile schisteuse du fond dont on craignait l'affouillement, on a épuisé dans l'intérieur de la caisse et on a pu ainsi creuser dans son intérieur de manière à descendre la fouille à 2m10 au dessous de la surface de l'argile.

Dans la fouille ainsi tenue à sec, on a construit en les bloquant contre les parois verticales de l'argile, des murs entre lesquels on a construit un massif de béton.

Ce massif a été monté dans la caisse étanche, jusqu'au niveau de la surface de l'argile, et dans la caisse non étanche jusqu'à 0m30 ou 0m40 au dessus de la limite inférieure de la partie étanche des parois.

En général lorsqu'on a terminé la couche de béton sur toute la hauteur qu'elle doit avoir, et qu'elle a pris consistance, on épuise l'eau qui peut se trouver dans la caisse et l'on achève à sec la construction de la pile dans l'espèce de vase formé par la couche de béton et par les parois en planches.

Une précaution très-essentielle, c'est de conserver pendant toute la durée du coulage du béton un trou dans la paroi de la

caisse à peu près au niveau de l'eau, sans cela l'eau s'élèverait dans le caisson en même temps que le béton et la charge qu'elle exercerait sur celui-ci pourrait devenir telle qu'elle se ferait jour en traversant le béton avant qu'il eût pris corps.

Il faut en outre que les cours de moises opposées soient reliées par des liernes transversales placées perpendiculairement au long coté de la caisse.

§.2. Coulage du béton.

Lorsqu'on a un volume considérable de béton à fabriquer pour établir des fondations au dessous du niveau de l'eau, il y a un grand intérêt à disposer le chantier dans lequel ce béton doit se préparer, de manière à diminuer autant que possible les frais de cette fabrication, c'est à quoi l'on parvient facilement en adoptant l'arrangement indiqué dans les fig 1 et 2 de la Pl. XXI. La légende suffit pour faire comprendre les avantages de cette disposition, d'après laquelle on a évité toute espèce de fausse manœuvre, en plaçant les hangards à chaux près des bassins à extinction, ceux-ci près du dépôt du sable, les manèges à mortier près du bassin de chaux et du sable; la fosse où tombe le mortier fabriqué à côté des plateformes à béton, et celles ci près du bord de la rivière au droit de l'emplacement de l'écluse.

Nous supposons le béton fabriqué et prêt à être immergé dans les caisses que nous avons décrites ou dans une fouille pleine d'eau. Pour faire cette opération avec succès, c'est-à-dire, de manière à prévenir le délavage du mortier et par suite la formation d'une boue calcaire incapable de durcir il convient de descendre le béton au fond de l'eau au moyen d'un vase prismatique dont la partie inférieure s'ouvre de

volonté et de manière à laisser échapper tout son contenu lorsque l'on relève le vase.

On peut employer à cet usage une caisse ayant la forme d'un prisme pentagonal, fig. 4 ou celle d'un demi cylindre, fig. 7.

La première est fermée au fond par deux portes dont les charnières sont en m et m' et qu'on maintient réunies soit par une tenaille représentée à coté de la fig. 4, soit par le moyen d'un loquet à griffe analogue à celui qui est représenté fig. 8.

Cette caisse se construit en tôle de 4 millimètres d'épaisseur. Celle employée par M. Emmery, à l'Ecluse de Notre Dame de la Garenne sur la Seine, contenait un mètre cube de béton et pesait, y compris les anses, charnières, tenailles &c. 190k. Elle avait coûté 250 frs.

Pour opérer le coulage du béton avec cette caisse, on avait établi extérieurement à l'emplacement de la couche de fondation en béton deux files de pieux reliés par des moises et couronnés par des chapeaux dont les faces supérieures étaient dans un même plan horizontal. Sur les chapeaux on avait fixé deux bandes de fer plat parfaitement parallèles et servant de rails à 4 galets adaptés sous une poutre Américaine de 20m de portée.

Cette poutre représentée Pl. XXI, fig 3 et 4, avait 2m.40 de hauteur, et portait à sa partie supérieure un plancher servant à l'approche du béton et s'étendant à droite et à gauche, soutenu par des solives appuyées à leurs extrémités sur des contre-fiches buttant sur les moises extérieures placées à la partie inférieure de la poutre.

Les moises intérieures correspondantes étaient à leur tour munies de rails sur lesquels étaient placés deux treuils montés sur des galets.

Sur l'arbre des treuils s'enroulaient les cordes servant à descendre et à monter les deux caisses à béton employées concurremment.

Pour remplir la caisse rapidement et éviter toute perte de temps de la part des rouleurs de béton, on avait pratiqué pour l'alimentation de chaque caisse deux sortes de trémies dont l'une est représentée fig. 4 : Elle est fermée du coté du treuil par une porte à charnière m, n, maintenue fermée au moyen d'un tourniquet o, de sorte qu'en manœuvrant ce tourniquet, la porte prenait la position n p et laissait tomber le béton dans la caisse élevée à une hauteur convenable.

La Caisse demi cylindrique employée par Mr. Pétot à la fondation de la digue de Koerhuan près de Brest était construite en tôle et formée de deux quarts de cylindre fixés à un même axe et maintenus l'un contre l'autre au moyen du loquet à griffes a b tournant autour d'un axe d et portant, en b un œil servant à fixer la cordelle nécessaire pour le soulever. Les griffes embrassaient deux morceaux de fer carré fixés à chacun des quarts de cylindre.

La caisse était suspendue à deux cables dont la position est indiquée sur les figures 9, 7 et 8, et en outre par un troisième cable aussi fort que les deux autres réunis, mais faisant seulement un tour sur l'arbre du treuil pour en faire un second sur une des traverses arrondie pour le recevoir et à laquelle on la fixe ou dont on la détache au moyen d'une cheville en fer autour de laquelle elle est repliée. Le cable de retenue ne sert qu'à contenir la caisse quand on referme le loquet.

Quelque soit le soin avec lequel on immerge le béton il se forme toujours une laitance calcaire abondante qui se dépose sur le sol de fondation et sur le béton auquel elle se mêlerait si on ne l'enlevait pas. On se sert pour cela d'une pompe dont le tuyau d'aspiration flexible est terminé par

une pomme percée de petits trous.

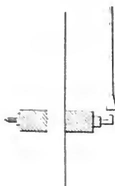
On facilite l'enlèvement de cette laitance en la poussant dans le point de la fouille où l'on fait agir la pompe. Pour la pousser, on se sert d'un balai plat en brins bouleau très flexibles, serrés entre deux planches boulonnées et fixées par le même boulon à un manche consolidé par deux petites jambes de force.

§ 3. _ Consolidation d'une caisse.

Lorsque l'on coule du béton dans une caisse profonde, il faut prendre des précautions pour empêcher la poussée de ce béton d'en écarter les parois.

Dans cette vue, on relie les cotés opposés entre eux soit par des liernes en bois armées de tirefonds, soit avec des tirants en fer. Ce dernier moyen est préférable, parceque le fer occupe moins de place et gêne moins pour opérer le dragage, et surtout parce qu'on peut ne placer les tirants en fer qu'après que le dragage est opéré. Pour cela on adapte aux moises des tirefonds terminés, dans l'intérieur de la caisse par des crochets tournés vers le haut, quand le roulage est prêt à les atteindre, on recherche les crochets à l'aide d'une espèce d'éteignoir à branches élastiques, emmanché à une tringle ronde bien dressée. Lorsqu'on les a trouvés et que les deux tringles répondant aux deux crochets opposés sont maintenus d'aplomb, on passe les bâtons dans les yeux des tirants que l'on a pu préparer de longueur, et si on les fait descendre de niveau, on ne peut manquer de les accrocher dans les branches saillantes des crochets. Lorsqu'ils sont rendus en place on enlève les bâtons.

Fig. 4



Cette manœuvre est indiquée fig. 4.

Article 4. – Fondation sur un Terrain incompressible, indéfini, et affouillable.

Les terrains incompressibles et affouillables sont le sable, le gravier, le caillou, l'argile compacte, les schistes &c.ª Ce sont ceux que l'on rencontre le plus fréquemment.

Dans ce cas, on doit chercher à disposer la fondation de manière que les affouillements, dans les limites où ils s'étendent ne puissent pas compromettre la solidité de l'ouvrage ou prévenir ces affouillements d'une manière ou relative ou absolue.

Le premier moyen s'emploie sur les rivières dont le cours n'est pas très rapide, ou dont la rapidité n'est pas suffisante pour produire des affouillements très considérables. Telles sont: la Marne, la Seine, l'Oise &c.ª

Le second sur des rivières torrentielles, telles que la Loire, l'Allier &c.ª

Sur les rivières qui ne produisent pas naturellement des affouillements considérables et imprévus, c'est-à-dire sur des rivières dont le régime est établi. (On dit que le régime d'un cours d'eau est établi, quand la résistance du fond est telle que la forme et la position du lit varient très peu.) on a exécuté pendant longtemps les fondations sur pilotis ou dans des enceintes de pieux ou de palplanches.

Ce système consiste à enfoncer dans l'emplacement que les piles et les culées doivent occuper, un nombre de pieux suffisant pour supporter le poids de l'ouvrage sans fléchir et sans s'affaisser sous cette charge, et à faire reposer l'édifice sur les têtes des pieux.

Sur les rivières à fond excessivement mobile, on crée, avec du béton un sol de roche artificielle qui s'étend d'une rive à l'autre, et sur lequel on élève le pont.

Nous allons successivement examiner les différentes cir-

circonstances de ce mode de fondation.

§1. Fondation sur pilotis

1°. Calcul du nombre de pieux.

Quelque soit l'enfoncement des pieux, la première condition à laquelle ils doivent satisfaire est celle de pouvoir porter le poids dont ils sont chargés. Péronnet a admis 25000^K pour limite maximum de la charge à faire supporter à un pilot de fondation, bien que dans plusieurs ponts il les ait chargés jusqu'à 52000 K^{mes}.

Pour déterminer cette charge d'une manière rationnelle, il faut se fonder sur les expériences faites sur la résistance des bois chargés dans le sens de leur longueur. On sait qu'une pièce de bois placée dans cette position commence à plier, puis se rompt sous une charge que l'on évalue moyennement à 3^K par millimètre carré de section. Si les pieux étaient isolés on ne devrait leur faire porter en charge permanente que le dixième de la force absolue, mais maintenus par le terrain dans lequel ils sont enfoncés, ou par les enrochements qui les enveloppent de toutes parts, on peut porter cette charge au 1/5 de la résistance absolue ou à 0^{K}60 par millimètre carré. En multipliant par 0.60 la section des pieux évaluée en millimètres carrés, on aura la charge que chacun d'eux pourra supporter et par suite leur nombre.

Prenons pour exemple un pieu carré de 0^m.20 sur 0^m.20; sa section sera 0^{mc}04, ou 40.000^{mm}, lesquels multipliés par 0^{K}6 donnent pour la charge que l'on peut faire supporter à un pieu 24000 K^{os}, ainsi la limite admise par Péronnet s'applique à des pieux de 0^m.20 à 0^m.21

Si la charge de l'édifice n'était pas répartie uniformément

sur sa base, il faudrait avoir égard à cette inégalité.

On est dans l'usage d'employer pour les pilots des bois en grume, c'est-à-dire qui n'ont pas été travaillés sur leurs faces et dont on se borne à enlever l'écorce et les inégalités, afin de ne pas rendre le battage difficile et afin d'obtenir la plus grande fiche possible. Ainsi le pieu qui porterait 25000 k aurait à peu près 0m25 de diamètre, sans compter l'aubier.

Cette dernière considération relative à la longueur de fiche de pieux est très-importante; ainsi, il arrive souvent, que dans les terrains de sable et de gravier, les pieux ne peuvent entrer que de 1m50 à 2m. et qu'à cette profondeur, ils présentent un refus absolu, alors il est indispensable de draguer avant de battre les pieux, parceque s'ils n'avaient pénétré que de 1m.50 dans le sol, ils pourraient se déverser et seraient déracinés au moindre affouillement.

Au pont de Bompas sur la Durance, malgré une fiche de 3m. le pont a été emporté parceque les pieux ont été affouillés. Le refus ne se fait pas seulement remarquer dans des terrains très anciens fortement agglutinés, mais aussi dans des sables et du gravier charriés tout nouvellement et que l'on fouille avec la plus grande facilité.

2° Battage des pieux

Pour enfoncer les pieux, on se sert d'une machine nommée Sonnette. On en distingue de deux sortes auxquelles on a donné le nom de sonnettes à tiraudes, quand le mouton est soulevé par des hommes, sonnette à déclic, quand le mouton, soulevé par un moyen mécanique quelconque est ensuite abandonné tout-à-coup à l'action de la pesanteur.

On nomme mouton le corps pesant, en bois ou en fonte, qui, par sa chûte sur la tête des pieux, produit leur

enfoncement.

Quel que soit le mode d'élévation du mouton, la construction des sonnettes est la même, ainsi on peut battre à tiraudes ou à déclic avec la même machine, quoique cependant toutes les sonnettes ne soient pas semblables.

Une sonnette ordinaire se compose Pl XXII fig. 1et 2, d'un patin horizontal.

2°. de jumelles verticales convenablement consolidées et entre lesquelles le mouton est maintenu dans ses mouvements d'ascension et de chûte.

Le patin se compose principalement de deux pièces: l'une longitudinale, sous la face de la sonnette, l'autre perpendiculaire à la première et assemblée sur celle ci en son milieu. Pour les consolider on les relie par deux goussets placés diagonalement.

Les jumelles placées sur la face de la sonnette s'élèvent au milieu de la semelle antérieure du patin, elles consistent en deux pièces verticales parallèles, distantes de 0m.10 à 0m.15 suivant la force du mouton que l'on emploie.

Ces jumelles sont maintenues dans leur position verticale par deux pièces inclinées, formant jambes de force, et assemblées du bas dans la semelle de la face, du haut dans les jumelles et par une troisième pièce qui porte le nom de queue et s'assemble du bas dans la semelle normale à celle de la face et du haut avec les jumelles. C'est dans le mode d'assemblage de ces pièces que la construction des sonnettes varie. On entretoise chaque jumelle avec sa jambe de force, au moyen d'entretoises horizontales équidistantes et placées à 2m ou 2m50 les unes des autres. Quelquefois on relie la queue aux jambes de force, par d'autres entretoises, mais cela se fait rarement.

La queue est traversée sur toute sa longueur par des

chevilles saillantes servant d'échelle pour monter au sommet de la sonnette où se trouve placée la poulie sur laquelle s'enroule le cable qui sert à soulever le mouton.

Ces dispositions générales doivent être modifiées:

1° Quand on a des pieux à battre dans l'angle d'une fouille profonde où le patin ordinaire ne pourrait pas se loger. On fait alors un patin angulaire. Pl. XXII fig. 11.

2° Quand les pieux doivent être battus au dessous de l'échafaud sur lequel repose la sonnette; alors il faut que les jumelles ne s'assemblent pas sur le patin, mais soient placées en avant et maintenues isolées sur trois faces au moyen de liernes fixées au patin d'une part et boulonnées sur les jumelles de l'autre. Pl. XXII fig. 3

Les moutons en bois sont formés d'un bloc rectangulaire en bois dur de dimensions suffisantes pour peser le poids qu'on doit lui donner pour enfoncer les pieux. En général, on n'emploie pas de mouton qui pèse moins de la moitié du poids des pieux, le plus souvent leur poids égale celui des pieux.

Les moutons en bois sont fortement frettés du haut et du bas, ils portent sur leur face postérieure, deux oreilles qui s'engagent entre les jumelles et sont maintenues par des clefs. Sur la face supérieure est un crampon auquel on fixe le cable. La face inférieure est garnie de clous à tête carrée et plate que l'on enfonce régulièrement de manière à recouvrir entièrement cette face, qui doit rester parfaitement plane, après la pose de cette garniture. Quand on néglige cette précaution, le mouton est promptement attaqué et par suite la tête des pieux se trouve elle-même fendue ou déformée, de sorte que les chocs ne produisent qu'une partie de l'effet que l'on s'en promet.

Les moutons en fonte employés avec les sonnettes ordinaires ont la forme de pyramide quadrangulaire tronquée. Une des faces de la pyramide, celle qui doit s'appliquer contre

les jumelles, est normale aux bases, les autres sont inclinées. Les oreilles ou queues sont en bois comme aux autres moutons. Pour les fixer dans les moutons, la mortaise qui les reçoit est taillée en queue d'aronde et se trouve plus haute que la queue n'a d'épaisseur, afin que la queue d'aronde que celle-ci porte puisse entrer dans la mortaise. Quand elle y est logée, on remplit par un coin fortement chassé, le vide qui se trouve au dessous; lorsque le renfort de la queue d'aronde s'est logé dans le vide correspondant de la mortaise.

Dans les sonnettes à tiraudes le cable fixé à un mouton passe sur la poulie supérieure placée au haut des jumelles et redescend derrière. Là, on y fixe, à une hauteur convenable, un nombre de cordes égal au nombre des ouvriers nécessaires pour lever le mouton, en supposant que chacun soulève de 15 à 20 K.os Les manœuvres que l'on emploie à ce travail se groupent de leur mieux au dessous de toutes ces cordelles, ils les saisissent en tenant les bras elevés au dessus de leur tête, et en se courbant tous à la fois à un signal donné, ils élèvent le mouton qu'ils laissent ensuite retomber. Comme ce travail est très fatigant, on ne bat de suite que de 20 à 25 coups de mouton, il faut pour cela 1'20". On se repose pendant un temps égal, ce qui fait 2'40." à quoi ajoutant 20" pour temps perdu, on voit qu'il faut par volée 3 minutes.

Dans les sonnettes à déclic le mouton est élevé lentement à une certaine hauteur, puis abandonné à lui-même en lâchant un déclic. On peut placer le déclic à la jonction du cable et du mouton, ou à l'autre extrémité de la corde, au point où la force est appliquée.

Le déclic à la jonction du cable et du mouton a eu différentes formes. Le plus simple est disposé comme l'indique la fig. 6 _ Pl. XXII. _ Le mouton est suspendu en a, à un crochet auquel se trouve fixé en b un anneau placé à

l'extrémité du cable, et en C une cordelle c d sur laquelle on fait effort pour produire le décrochement du mouton. Le crochet est tracé suivant un arc de cercle dont le centre est en o, centre du tore de l'anneau c.

On se sert quelquefois d'une tenaille disposée comme l'indique la figure 7 – Planche XXII. Cette tenaille est montée sur une chappe représentée fig. 13 et maintenue dans sa position parallèle aux jumelles, par une armature indiquée fig. 12. Pour produire la chûte du mouton, on fixe aux jumelles à la hauteur convenable, un bloc de bois percé d'un trou dans lequel s'engagent les branches supérieures de la tenaille qui sont ainsi forcées de se rapprocher du haut, par conséquent de s'ouvrir du bas pour laisser échapper le mouton.

Enfin, on place quelquefois le déclic sur le treuil même qui sert à élever le mouton, pour cela, on dispose ce treuil, de manière que l'on puisse facilement, au moyen d'un levier à fourchette faire échapper les dents du pignon de l'arbre à manivelle, de celles de la roue adaptée à l'arbre qui porte le cylindre sur lequel s'enroule le cable.

Cette disposition est simple et peu coûteuse à établir; mais le mouton ne descend pas aussi rapidement que s'il était entièrement abandonné à son propre fonds. Il est retenu dans sa chûte et par le frottement de l'arbre de treuil, et par la raideur de la corde. D'un autre côté, la corde dans ce mouvement rapide, s'use très-promptement sur toute sa longueur, et particulièrement près de l'attache au mouton.

Peut être gagne-t-on plus de temps parceque l'on n'a rien à accrocher, mais encore cet avantage est-il très-faible, par la raison que la corde se déroule nécessairement de plusieurs tours après que le mouton a frappé le pieu. Par ces motifs, nous préférons le crochet ou la tenaille.

Dans quelques circonstances on s'est servi de chevaux

pour élever le mouton ; alors la corde, après avoir passé sur la poulie placée au sommet des jumelles, s'enroulait sur l'arbre d'un treuil adapté aux pièces inférieures de la sonnette, à ce même arbre était fixée une poulie de 3m.30 de diamètre dans la gorge de laquelle passait la corde à laquelle le cheval était attelé. Les allées et venues continuelles du cheval faisaient nécessairement perdre beaucoup de temps.

Pour savoir quelle influence le poids du mouton exerce sur l'enfoncement des pieux, il est nécessaire d'entrer dans quelques détails.

On sait que quand un corps en mouvement d'une masse M en choque une autre en repos d'une masse m, celui-ci acquiert une vitesse qui est donnée par la formule suivante :

$$v\,(M+m) = MV \text{ d'où } v = \frac{MV}{M+m}$$

V étant la vitesse du corps choquant et v la vitesse que prend le corps en repos et m sa masse. On sait, par des expériences que l'enfoncement est proportionnel au produit de la masse en mouvement, laquelle est (M+m) multipliée par le carré de la vitesse v ou en remplaçant v par sa valeur.

$$(M+m)\,\frac{M^2V^2}{(M+m)^2} = \frac{M^2V^2}{M+m}.$$

si on met au lieu de V^2 sa valeur $2gh$, h étant la hauteur de chute du mouton, on obtient :

$$\frac{2g\,M^2h}{M+m} \dots\dots\dots\dots\dots (1)$$

et si on divise les deux termes de la fonction par M, il viendra :

$$\frac{2g\,Mh}{1+\frac{m}{M}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Il résulte de cette expression :

1° Que pour un même mouton l'effet produit est proportionnel à la hauteur à laquelle on élève le mouton.

2° Que si on combine l'élévation et le poids du mouton de manière que le produit Mh soit constant pour plusieurs moutons l'effet sera d'autant plus grand que M ou la masse du mouton sera plus forte. On voit donc qu'il y a avantage à employer de gros moutons, parceque le produit Mh est proportionnel à la dépense, et que pour une même dépense l'enfoncement augmente avec la masse du mouton.

Par la formule (1) on voit que si l'enfoncement est simplement proportionnel à la hauteur de la chûte, la dépense est aussi proportionnelle à cette chûte, ainsi il n'y a pas d'économie à faire tomber le mouton de très-haut, et comme il arrive souvent que cela écrase les pieux, il est préférable en général de n'employer que de gros moutons, et de les faire tomber d'une hauteur modérée 2m.50 à 3 ou 4 mètres.

Il est souvent avantageux de cesser le battage sur un pieu, pour le reprendre ensuite. Il est probable que le repos donne le temps au terrain qui avoisine le pieu, de transmettre à une certaine distance la compression qu'il a éprouvée, et que, quand on recommence le battage, le sol ayant repris un peu d'élasticité, donne au pieu une nouvelle facilité pour enfoncer.

Il est très-important, lorsque les pieux doivent être très-chargés de s'assurer qu'ils ont obtenu un refus absolu et non pas un refus relatif. Le refus absolu est celui qui est obtenu par l'effet de la résistance naturelle du terrain, et non celui qui résulte de la compression du sol, par l'effet du battage des pieux et n'est dû qu'au frottement. Pour ne pas arriver simplement, à un refus relatif, il faut commencer

le battage par le centre de la fondation et le continuer en s'avançant progressivement vers les bords, il faut aussi dans les terrains où le sol résistant est très-bas, diminuer toutes les causes de frottement et par conséquent dresser les pieux avec soin.

On considère un pieu comme parvenu au refus absolu, quand l'enfoncement n'est plus que de 0m.003 à 0m.005 par volée de 30 coups d'une sonnette à tiraudes, ou par coup de mouton d'une sonnette à déclic tombant de 4 à 5m.; car pour les derniers coups, on fait tomber le mouton de plus haut. Lorsque le poids à supporter par les pieux n'est pas considérable, on n'a pas besoin d'arriver à un refus aussi absolu, on peut quand chaque pieu ne porte que 7 à 8000 Kg. arrêter le battage quand l'enfoncement n'est plus que de 0m.03 à 0m.04 ou 0m.05 par volée, si toutefois on est sûr que les pieux ont pénétré dans un terrain résistant. Au pont de Neuilly, où les pieux avaient à supporter jusqu'à 52.000k pour un diamètre de 0m.325, on cessait le battage quand l'enfoncement n'était plus que de 0.m0045 par volée de 25 coups d'un mouton de 600k tombant de 1m.40.

La volée de 30 coups dure 3 ou 4 minutes y compris le repos.

Un atelier travaillant dix heures, bat dans un jour 120 volées seulement, parcequ'il y a du temps perdu à transporter les pieux, à les mettre en fiche, à déplacer les sonnettes &c.

Il est certains terrains dans lesquels le battage se fait mieux avec une sonnette à tiraudes qu'avec une sonnette à déclic et réciproquement. L'expérience seule peut éclairer à ce sujet. En général il est avantageux de commencer le battage avec une sonnette à tiraudes, et de terminer avec une sonnette à déclic.

Comme la glaise transmet latéralement la pression

à laquelle elle est soumise, si on enfonce des pieux par le petit bout dans un sol glaiseux, l'enfoncement des derniers pieux fait remonter les premiers, on évite cet in-convénient en les enfonçant par le gros bout.

Quelque soit le mode de battage, il est nécessaire d'affûter les pieux par le bout qui doit entrer dans le terrain et de défendre la tête pour qu'elle ne se fende pas sous le choc du mouton.

L'extrémité des pieux est armée de sabots en fonte ou en fer forgé, représentés Pl XXII ; il est néces-saire de les assujettir solidement. Ceux en fonte sont disposés comme l'indique les fig. 8 et 9

Dans l'une, une broche barbelée en fer forgé qui a été placée dans le moule au moment du cou-lage, sert à fixer le sabot à l'extrémité du pieu. Dans l'autre, le culot en fonte est percé d'un trou dans lequel on fait passer la broche barbelée dont la tête forme la pointe du sabot.

Ceux en fer forgé sont à 3 ou 4 branches, comme dans la fig. 10. Pour enfoncer la broche barbelée dans la pièce, on se sert d'un chasse-pointe évidé qui entoure la pointe sans la toucher.

La tête du pieu est coupée perpendiculairement à la direction qui passe par la pointe du pieu, par le centre de gravité et par le milieu de la tête ; on abat les arêtes, on cercle la tête avec une ou deux frettes.

La force des frettes et celle des sabots sont nécessairement proportionnés à la dimension des pieux, à la dureté du terrain, à l'enfoncement que l'on a besoin d'obtenir.

3.° Battage.

3° Battage des pieux d'une pile.

Lorsque le sol incompressible du lit d'une rivière n'est pas exposé à des affouillements indéfinis, soit parceque la vitesse de l'eau n'y est pas très-grande, soit parceque le terrain affouillable repose sur un banc de terrain inaffouillable, on fonde souvent les piles des ponts sur pilotis.

Dans ce cas, après avoir calculé comme nous l'avons vu, le nombre des pieux à employer pour supporter la charge et avoir réparti les pieux de la manière la plus convenable, sous la fondation, on prépare au pourtour de l'emplacement qu'occupent les piles, un échafaud qui s'approche à 0m.40 ou 0m.50 des lignes de pieux extérieurs et on élève cet échafaud à une hauteur suffisante pour qu'il ne soit pas submergé par les légères crues d'été, dont on a pu connaître la hauteur par des observations qui se font sur tous les grands cours d'eau. L'échafaud est formé de pieux battus à 1m.50 ou 2m. de distance, enfoncés à peu de profondeur dans le sol, et reliés par des liernes horizontales ou des chapeaux sur lesquels on place les madriers du plancher. Toutes ces pièces doivent être fixées à boulons et écrous, afin de n'être pas entraînées par les eaux, si elles s'élevaient assez haut pour les faire flotter.

Cet échafaud sert à supporter les sonnettes employées au battage des pieux. Cette opération doit toujours commencer par la ligne des pieux du milieu et par le milieu de cette ligne. Cette précaution est nécessaire pour que la pression produite dans le sol par l'enfoncement des premiers pieux ne rende pas plus difficile l'enfoncement des derniers, comme cela arriverait si on procédait autrement.

Quand l'échafaud est élevé à une hauteur assez notable au dessus du niveau auquel doivent être placées les

têtes des pieux sous la maçonnerie, on perdrait une certaine longueur de bois si on arrêtait le battage à la hauteur de l'échafaud.

Si les eaux sont basses, on emploie pour achever le battage une sonnette à jumelles inférieures au patin Fig. 3. Si les eaux affleurent l'échafaud, on se sert d'un chasse-pieux. Ce chasse-pieux est ordinairement un bout de pieu fortement fretté à sa partie supérieure et portant à sa partie inférieure une frette à douille qui dépasse le bois des chasse-pieux, et peut ainsi embrasser le pieu lui-même sur 0m.08 ou 0m.10 de longueur. Quelquefois, au lieu de cette douille, on met dans l'axe du chasse-pieux un goujon qui entre dans la tête du pieu, mais ce goujon casse souvent, et il est difficile de remettre le chasse-pieux en place quand il en est sorti; il est guidé entre les jumelles comme le mouton.

Sur les pieux ainsi enfoncés il y a plusieurs moyens d'établir la fondation.

1° Fondation sur plate-forme.

Si la rivière est à son niveau le plus bas et qu'on n'ait pas à craindre une crue, on peut recéper tous les pieux à une même hauteur au dessus de l'étiage, puis échouer sur ces pieux des longrines d'égale épaisseur et sur ces longrines un plancher. En plaçant un plancher à peu de profondeur sous l'eau, 0m.40, 0m.50, il est facile de poser la première assise de la fondation sur ce plancher et d'élever ensuite le surplus de la maçonnerie qui se trouve affranchie de l'eau.

Pour échouer les longrines on perce des trous sur le milieu de la tête des pieux, et on pose dans chaque trou des barres de fer rond qui s'élèvent au dessus de l'eau et que l'on maintient dans une position verticale. On peut ainsi

relever parfaitement la position de ces espèces de jalons et préparer une pièce de bois percée de trous disposés de telle sorte que les trous correspondent à chacun de ces jalons lorsqu'on la présentera au dessus et qu'elle descende exactement sur la tête des pieux en faisant passer chaque barre dans son trou. Lorsqu'elle est ainsi appliquée, on fait descendre successivement sur chaque barre un tuyau armé de pointes à son extrémité inférieure. On enfonce ces pointes légèrement dans le bois, on enlève la barre de fer et on y substitue une broche en fer que l'on fait glisser dans le tuyau à la place de la barre et qu'il est ensuite très facile d'enfoncer sous l'eau avec un pilon en fonte.

Quand on a ainsi fixé les longrines sur les pieux, on amène dans l'emplacement de la pile le plancher dont les madriers ne sont reliés que par quelques planches clouées sur la face supérieure. Ces madriers sont préalablement percés de trous placés de manière à répondre aux longrines, de sorte que quand la plate forme est arrivée à sa place, on peut, en la chargeant suffisamment, la faire appliquer sur les longrines; alors il est facile de l'y fixer par des broches que l'on enfonce dans les trous préparés à l'avance, comme nous venons de le dire.

Si la plate forme à placer sur la tête des pieux devait se trouver à une grande hauteur au-dessus du fond de la rivière, il y aurait à craindre que les pieux ne se déversassent par l'effet d'une poussée horizontale qui ne serait pas détruite. Pour remédier à cet inconvénient, il convient dans ce cas de remplir avec des moellons tous les vides entre les pieux et même d'étendre l'enrochement au pourtour de la pile. Cet enrochement a le double avantage de maintenir les pieux dans leur position verticale et de défendre le sol contre les affouillements.

Quand le terrain a une résistance qu'il peut être avantageux d'utiliser, au lieu de placer sur les traversines un plancher, on les relie par des longrines plus ou moins nombreuses; on forme un enrochement entre les pieux et jusqu'à fleur de ces longrines; on pilonne ces enrochements; enfin, on coule du béton jusqu'au niveau de l'étiage, ou au moins jusqu'à la hauteur où l'on peut poser une première assise du parement. Mais alors il faut pour maintenir le béton, enceindre la fondation d'une ligne de palplanches ou de pieux jointifs suivant la profondeur du sol résistant.

Lorsqu'on peut enceindre de batardeaux l'emplacement dans lequel une culée, un mur de quai, une pile, doivent être construits sur pilotis, et que le sol est peu perméable, on épuise dans l'enceinte et on y pose le grillage et la plate forme sans difficulté, mais non pas mieux que quand on immerge la plate-forme sur la tête des pieux d'après le procédé qui vient d'être décrit.

5° Fondation par caisson.

Quand la rivière sur laquelle on a une fondation de piles à faire est exposée à des variations de niveau fréquentes et assez considérables, mais surtout quand il y a une grande profondeur d'eau, l'emploi du procédé que nous venons de décrire n'est pas possible. Il faut en adopter un autre qui consiste à recéper les pieux de niveau et à leur faire supporter directement une plate-forme très-épaisse et très-solide à laquelle on attache des bords mobiles suffisamment élevés pour que la caisse ou le caisson ainsi fait ne soit pas surmonté par les petites crues, après son échouage sur la tête des pieux.

Les caissons sont ordinairement construits comme l'indique

la planche XXIV. Le fond est formé :

1° D'un cadre en fortes pièces autour de la plate-forme.

2° De racinaux ou traversines jointives dirigées normalement à la longueur du caisson et assemblées aux deux extrémités dans les pièces du cadre.

Quelques constructeurs ont donné une épaisseur uniforme à toutes les traversines, et les ont rendues solidaires les unes des autres, soit en faisant passer des boulons dans l'épaisseur du fond, de manière à relier les traversines deux par deux, soit en plaçant au dessus des traversines des longrines répondant à l'aplomb des rangs de pieux, comme au pont de Sèvres, fig. 6. D'autres ont donné plus d'épaisseur aux traversines répondant aux lignes transversales de pieux et ont nivelé les vides restant entre les traversines plus épaisses, au moyen de bouts de madriers perpendiculaires à la direction des traversines.

Les uns ont placé les chapeaux de rive à l'aplomb des rangs de pieux extérieurs, les autres les ont mis en saillie. Comme les chapeaux, dans l'intervalle des traversines qui répondent aux rangs de pieux, supportent la charge des traversines intermédiaires, nous pensons que la première disposition est préférable. Il en résulte, il est vrai que les pieux extrêmes sont moins chargés que ceux de l'intérieur, mais il y a à cela plus d'avantage que d'inconvénient.

Quant à ce qui concerne la disposition des traversines et à leur assemblage, nous pensons que ce qu'il y aurait de mieux à faire serait de placer sur les pieux avant l'échouage du caisson, des longrines plates de 0^m40 de largeur et 0^m15 d'épaisseur. On les mettrait en place en les immergeant à l'aide de tiges directrices en fer rond, comme nous l'avons dit ci-dessus, et elles porteraient parfaitement le fond du caisson auquel on pourrait donner beaucoup moins d'épaisseur que dans les caissons ordinaires

où le poids total est porté sur 1/5 environ des traversines. Ce moyen a été employé au pont de Berry-au-bac sur l'Aisne, mais pour une fondation à 0m.40 au dessous de l'eau. On pourrait l'employer à toute profondeur.

Les chapeaux formant le cadre du fond d'un caisson, sont assemblés aux angles par des tenons ouverts disposés en queue d'aronde, fig. 9 et sur leur longueur par des traits de Jupiter simples, fig. 10. Chacun de ces joints d'assemblage est renforcé latéralement par une plate bande fixée par deux boulons aux chapeaux et aux traversines en dessus et au-dessous par deux autres plates-bandes fixées également par deux boulons.

Pour relier le cadre aux traversines, on place à 1m. ou 1m20 d'intervalle des boulons (fig. 7) qui traversent le cadre horizontalement et s'enfoncent de 0m.30 au moins dans les traversines. La tête des boulons est extérieure, le bout taraudé débouche dans un trou pratiqué dans la face supérieure d'une traversine (fig. 3.4.7). On place l'écrou dans ce trou et on tourne le boulon par la tête pour le serrer, une rondelle doit être placée sous la tête, afin que le bois ne soit pas haché par le mouvement de rotation.

Les bords du caisson, comme nous l'avons dit sont mobiles et peuvent servir pour la fondation de toutes les piles d'un pont. Pour cela ils sont divisés en panneaux de 2 à 3m. de longueur formés de planches reliées solidement par des traverses, de manière à ne pas se déranger dans les transports qu'on leur fait subir. Ces panneaux sont assemblés du bas dans une rainure creusée dans la face supérieure des chapeaux de rive (fig. 1 et 7) et latéralement dans des poteaux verticaux portant rainures sur leurs faces latérales et assemblés également sur les chapeaux fig. 8.

Pour maintenir ces bords on relie les poteaux opposés par des entretoises assemblées à tenons et mortaises, fig 5 et 6, et on rattache ces entretoises au fond au moyen de tirefonds a b disposés comme dans les fig. 5 et 6. _ Outre cela ces entretoises sont reliées entr'elles par des moises c qui sont placées près des bords, afin de ne pas gêner l'approche des matériaux fig. 1, 2, 5 et 6. Ces moises suivent les contours anguleux des bords du caisson à ses deux extrémités.

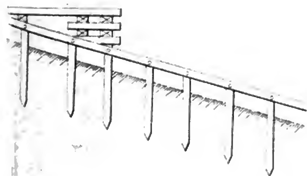
Les bois employés à la construction du fond entier du caisson doivent être de la meilleure qualité pour que leur durée soit illimitée. Les bords, au contraire, qui ne servent que pendant quelques mois, peuvent, sans inconvénient, être exécutés en bois de médiocre qualité.

Avant de mettre un caisson à l'eau, il faut que le fond et les bords soient soigneusement calfatés, afin que l'on puisse travailler à sec dans son intérieur. Lorsque les joints des traversines entr'elles sont dressés avec soin, on obtient une étancheité parfaite en mettant dans les joints ainsi dressés des bandes d'étoffe de laine suiffées. Ce moyen nous a parfaitement réussi pour deux bâches de 2m50 de profondeur. Quelquefois on a placé sur les joints calfatés, de la glaise qu'on recouvre de mousse, et on comprime le tout avec des lattes minces clouées solidement sur les deux pièces formant le joint qu'on veut consolider. Cette précaution se prend sur tous les joints.

Les caissons doivent autant que possible être construits sur les bords de la rivière, sur un bâtis en pièces de bois posées en croix les unes sur les autres afin que l'on puisse circuler sous le fond sans trop de difficulté. (Voir la figure ci-après)

Quand un caisson est terminé et calfaté sur

tous ses joints, on établit sous l'échafaud de construction et jusques au bord de l'eau (Voir la figure) une cale inclinée à 3 ou 4m. de base pour un de hauteur. On soutient les pièces de bois qui forment cette cale, de manière qu'elles ne puissent pas fléchir sous le poids du caisson, et on les prolonge dans l'eau de manière à soutenir le caisson jusqu'à ce qu'il flotte. On enveloppe celui-ci d'une ceinture de cable et à cette ceinture on attache plusieurs autres cables passant sur des cabestans solidement amarrés à des pieux de retenue. Quand ces préparatifs sont faits on enlève les cales qui supportent le caisson et il vient s'appuyer sur les coulisses dont nous avons parlé. Comme l'inclinaison est assez considérable pour qu'il tende à glisser, on le retient avec les cabestans et on le laisse descendre doucement jusqu'à ce qu'il soit près à plonger dans l'eau; alors on peut le lâcher tout à coup, on est assuré qu'il n'acquerra pas une trop grande vitesse. (Voir le croquis ci contre). Trois ou quatre cours de pièces longitudinales peuvent servir pour la cale, il faut qu'elles soient reliées entr'elles et au bâtis qui a servi à la construction, afin qu'elles ne se dérangent pas dans l'opération de la mise à l'eau.



Lorsque le caisson est lancé, on l'amène près de la rive la plus voisine du chantier et là on y exécute le cube de maçonnerie nécessaire pour qu'il plonge presque à la profondeur à laquelle les pieux ont été recépés. Cette maçonnerie doit s'exécuter par assises horizontales afin d'obtenir un enfoncement uniforme.

Quand le caisson est ainsi chargé, on le conduit

dans l'emplacement qu'il doit occuper sur les pieux. Là, au moyen de fils tendus d'une rive à l'autre, si le cours d'eau n'a pas une grande largeur, ou à l'aide de voyans placés sur les rives, sur le caisson et sur l'échafaud, on place ce caisson exactement dans la position qui lui convient. On l'y maintient soit avec des pieux battus ad hoc, soit avec des coulisseaux verticaux adaptés aux échafauds, puis on y introduit de l'eau pour le faire échouer sur les pieux. Si la position n'est pas exacte, on enlève l'eau du caisson et on le remet à flot. Si au contraire il est bien placé on le charge en déposant des materiaux sur des madriers appuyés sur les bords.

Deux précautions essentielles doivent être prises au moment où l'on va mettre le caisson en place. L'une consiste à faire glisser à la hauteur des têtes de pieux une pièce de bois horizontale fortement maintenue par des montants et une traverse, et à la promener d'une extrémité de la pile à l'autre pour enlever les pierres et autres corps étrangers qui seraient tombés sur la tête des pieux et qui empêcheraient le caisson de s'appliquer exactement sur ces pieux.

La seconde a pour objet de faire échapper de dessous le fond du caisson les morceaux de bois qui auraient pu s'y placer et y rester, par suite de la légèreté spécifique du bois qui, étant moins lourd que l'eau ne s'échapperait pas naturellement.

On les enlève en faisant passer à plusieurs reprises sous le fond du caisson flottant un chapelet formé de boules d'environ 0m10 de diamètre, enfilées sur une corde et maintenues à une distance de 0m80 les unes des autres au moyen de nœuds.

Une fois le caisson bien fixé, on élève rapidement

la maçonnerie jusqu'au dessus de l'eau et on démonte les bords pour les employer à un autre caisson dont le fond a été construit pendant qu'on exécutait la maçonnerie dans le premier. Si les bords adhèrent trop fort aux chapeaux, comme cela arrive lorsque les assemblages ont été faits avec soin et en bois sec, on se sert de crics pour les enlever. Il faut avoir soin de les amarrer d'avance avec des cordes, parceque les bois imprégnés d'eau sont quelquefois plus lourds que l'eau et couleraient à fond.

6: Recépage des pieux.

Le mode de fondation que nous venons de décrire exige que les pieux sur lesquels le fond du caisson doit reposer soient tous coupés exactement dans un même plan horizontal. Pour faire cette opération, on se sert de machines connues sous le nom de scie à recéper. On en a imaginé de beaucoup de formes différentes. Nous n'en décrirons que trois qui peuvent être considérées comme les types de toutes les autres.

Scie de M. Vallée.

La plus simple de ces machines se compose (Pl. XXV) d'une lame de scie ordinaire adaptée à une armature en fer forgé, fixée elle-même à un cadre en bois qu'on fait glisser sur des pièces horizontales en bois placées sur l'échafaud. L'armature est représentée de profil sur les fig 1 et 3 et se compose:

1°. De deux fermes dans chacune desquelles un montant de 0m.08 sur 0m.015 environ est maintenu par deux

espèces de contrefiches rivées sur le montant à 0m25 de son extrémité inférieure.

2°. D'une croix de St André servant à bander la scie et placée à cet effet entre les deux montants des fermes que nous venons de décrire. Cette croix de St André est représentée fig. 6 et 7, et à sa seule inspection on comprend comment les vis, en resserrant les montants du haut, les écartent du bas.

Le chassis est formé de deux coulisses réunies par deux entretoises dans le milieu desquelles passent les montants de l'armature.

Au chassis sont fixées des barres transversales auxquelles sont appliqués les ouvriers qui mettent la scie en mouvement.

Pour recéper de niveau avec cette scie, il faut que les pièces de l'échafaud sur lesquelles glisse le chassis soient parfaitement horizontales et bien graissées avec du savon gras.

Il vaudrait mieux munir le chassis de 4 galets que l'on ferait glisser sur un petit chemin de fer.

On peut recéper avec cette scie 16 à 18 pieux en un jour.

Le croquis Pl. XXV. fig. 9 représente une modification de la scie de M. Vallée dont on fait usage quand on n'a pas besoin que le plan de recépage soit parfaitement horizontal. On conçoit en effet que dans cette disposition la scie n'est pas suffisamment consolidée dans le sens latéral, et n'a pas assez de stabilité pour assurer la parfaite régularité du recépage. Une combinaison des deux machines serait probablement très-avantageuse. On bande la scie au moyen d'une barre coudée, t en élévation et a b c d en plan, dont les extrémités taraudées traversent

les montants au pied desquels est fixée la scie. Au moyen d'écrous on écarte les montants.

Scie circulaire.

La scie qui vient d'être décrite n'est applicable qu'au recepage des pieux à peu de profondeur au dessus de l'eau. Lorsque M. de Cessart a fondé, à 5m au dessous de l'étiage de la Loire, les piles du pont de Saumur, il avait besoin d'un appareil plus stable et il a fait construire une scie à mouvement alternatif adaptée à un plateau horizontal suspendu au moyen de quatre tiges verticales. Cette machine a toujours parfaitement fonctionné, mais son installation était très-dispendieuse; son déplacement long et difficile, et bien qu'ayant donné de très-bons résultats pour les recepages auxquels on l'a utilisée, on n'en a pas construit un second spécimen.

Lors de la fondation du pont de Bordeaux, M. Vauvilliers, Ingénieur en chef chargé de la direction des travaux, a imaginé une scie circulaire qui a fait un bon service, mais elle était dispendieuse et elle n'est plus à la hauteur des progrès réalisés dans la construction des machines.

La planche XXVI représente un système de scie circulaire qui, imitée de plusieurs appareils analogues, serait d'un bon usage et ne donnerait lieu qu'à une dépense peu considérable.

Elle se compose d'un axe vertical supporté par trois galets coniques au moyen d'un plateau que l'on peut hausser ou baisser à volonté en déplaçant le goujon f et les vis d qui le fixent à l'axe pour les changements de 0m 12 à 0m 15, et en manœuvrant les écrous b pour les déplacements peu importants.

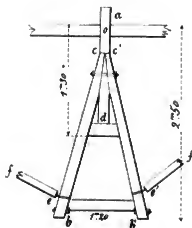
Les galets eux mêmes reposent sur un chassis ABCD mobile sur les galets placés à ces quatre points.

L'axe est maintenu dans sa position verticale au moyen de trois tringles (C) en fer fixées du bas à une bague dans laquelle passe cet axe, et du haut au chassis mobile portant le mécanisme.

Le mouvement de propulsion est donné par une vis g adaptée au chassis en bois et passant dans un écrou fixé au chassis mobile en fer.

Quelle que soit la scie que l'on choisisse parmi celles que nous venons de décrire, il faut nécessairement disposer sur l'échafaud des pièces de charpente parfaitement horizontales sur lesquelles le cadre ou le chariot qui supporte la scie puisse cheminer en restant constamment à la même hauteur. Cette condition est indispensable pour que le plan de recépage soit parfaitement horizontal. Si par hasard cependant un pieu était traversé par un morceau de fer, par une pierre, comme cela arrive quelquefois, et que la scie ne pût pas couper dans le plan prescrit, il faudrait recéper le pieu plus bas et y rapporter une cale d'épaisseur convenable.

Scie oscillante.



Quand au lieu d'avoir à poser un caisson ou une plate forme sur la tête d'un pilotis, on n'a besoin que de recéper des pieux à peu près au même niveau, on se sert d'une scie oscillante représentée dans le croquis ci contre. La lame bb' est fixée à deux pièces bc, b'c' reliées à une troisième a d sur laquelle

elles sont assemblées et boulonnées en c et c'; leur écartement est maintenu par l'entretoise d. La pièce a d est soutenue en a par un axe horizontal. Deux perches e f, e'f', fixées par deux pitons formant charnières en e et e' servent à imprimer à la scie le mouvement alternatif et en même temps à appuyer la scie contre le pieu, en ne les tirant pas dans un même plan vertical et en plaçant le pieu dans l'angle obtus que forment alors les verges en projection horizontale.

7°. Fondation par encaissement.

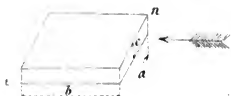
Les fondations sur pilotis sont assez coûteuses tant à cause de la masse de bois qu'elles exigent, qu'à cause des frais de recépage, de caisson, &c. qui viennent accroître la dépense. Aussi, depuis que l'on a concédé à des spéculateurs la construction des ponts suspendus et autres, a-t-on cherché un mode de construction plus économique. Cette considération a conduit à exécuter la fondation des piles de pont dans des encaissements, en pieux et palplanches jointives, analogues à ceux que nous avons décrits pour les fondations sur le rocher recouvert d'une couche de terrain affouillable. Ainsi, on enfonce d'abord, suivant le contour que doit avoir cet encaissement, des pieux équarris et dressés que l'on écarte de 1m à 2m, on réunit ces pieux par des moises doubles laissant entre elles un intervalle de 0m.10 ou 0m.12, suivant la profondeur de l'eau, puis on bat dans ces vides des panneaux de palplanches jointives que l'on enfonce le plus profondément possible.

Si le sol était difficile à pénétrer quoique facilement affouillable, on draguerait avant de commencer

le battage des pieux, mais le draguage doit s'étendre sur une surface plus considérable que l'emplacement de la pile. Quand on ne drague pas avant le battage, on drague après. Dans l'enceinte ainsi creusée on coule du béton, et on fonde comme nous l'avons dit plus haut.

8°. Enrochements.

Quand, dans les fondations par encaissement ou sur pilotis, les pieux et les palplanches n'atteignent pas un sol inaffouillable, il est indispensable de former autour des piles des enrochements assez stables pour n'être pas entraînés par les eaux. On a cherché le moyen de déterminer les dimensions à donner aux blocs de pierre employés à ces enrochements, pour qu'ils résistent au courant. Gauthey a fait à ce sujet des expériences et des calculs dont voici le résumé.



Soit mn, une pierre ayant une longueur b, une largeur a, une épaisseur c, nous la supposerons choquée par l'eau perpendiculairement à la face ac et nous admettrons que l'effet résultant de ce choc est proportionnel au carré de la vitesse V de l'eau et à la surface choquée. De sorte que si h est la hauteur due à la vitesse et m un coefficient à déterminer par l'expérience, $m\,a\,c\,V^2 = m\,a\,c\,2gh$ représentera cette force, qui tendra, soit à renverser la pierre, soit à la faire glisser.

Prenons d'abord le cas du renversement, nous aurons pour moment de stabilité de la pierre.

$$\pi\, a\, b\, c\, \frac{b}{2}$$

π étant le poids du m.c. de pierre immergée; et pour celui de la force qui tend à renverser

$$m\,a\,c\,2gh \times \frac{c}{2}$$

en égalant ces deux quantités, il vient :

$$\pi' \frac{ab^2c}{2} = mac \times ghc$$

d'où en réduisant et tirant la valeur de h.

$$h = \frac{\pi' b^2}{2gmc}$$

Ainsi h sera d'autant plus grand que b sera plus grand et c plus petit, il y aura donc avantage à accroître la longueur des pierres et à diminuer leur épaisseur.

Dans le cas du glissement, on aurait en appelant f le coefficient du frottement.

$$f \times abc\,\pi' = m \times 2ghac$$

d'où $$h = \frac{\pi' f b}{2gm}$$

Dans ce cas il y a encore avantage à allonger les pierres ; Gauthey a trouvé par expérience que $m' = 1$

Enfin si la pierre était placée sur un talus faisant avec l'horizon l'angle α, l'équation d'équilibre deviendrait dans le cas du glissement.

$$abc \times \pi' (f \cos\alpha - \sin\alpha) = ac2ghm$$

d'où .... $h = \frac{\pi' b}{2gm} \, (f \cos\alpha - \sin\alpha)$

Nous avons supposé que le choc était perpendiculaire à la face ac, parceque, autour d'une pile il y a des tourbillons qui peuvent rendre la direction du choc perpendiculaire à cette face.

La valeur du frottement f est ici de 1.20, attendu que les blocs se maintiennent ordinairement suivant une in-

inclinaison de 5 de base pour 6 de hauteur

Article 5

Fondation sur un sol éminemment affouillable.

Les torrents et les grandes rivières, qui ont une pente très-considérable attaquent continuellement le sol sur lequel coulent leurs eaux et le déplacent quelquefois d'une manière très-sensible pendant la durée d'une crue de peu de jours. Le sol, constamment remué, est nécessairement formé de sable et de cailloux, car la terre végétale, l'argile, la tourbe sont entraînées.

Sur un terrain aussi mobile, et en même temps si difficile à pénétrer, les fondations sur pilotis présentent très-peu de sécurité, parceque, malgré toutes les précautions que l'on a pu prendre, on n'est jamais assuré qu'un affouillement ne viendra pas déraciner la fondation que l'on a faite. Aussi peut-on citer de nombreux exemples de ponts détruits, quoique fondés avec grand soin sur des pilotis bien établis.

Le seul moyen d'arriver à une fondation durable dans une rivière à fond mobile, est de créer sur toute l'étendue du pont et aux abords un sol factice capable de résister à la corrosion ; c'est ce que l'on nomme un radier-général.

Les exemples les plus remarquables de ce genre d'ouvrage ont été donnés sur l'Allier. L'un pour la fondation du pont de Moulins ; l'autre pour la fondation du

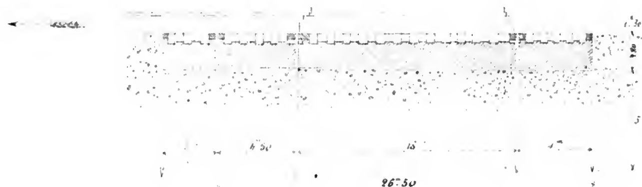
pont-aqueduc du Guétin construit pour faire passer sur l'Allier le canal latéral à la Loire.

Nous entrerons dans quelques détails sur ces deux ouvrages.

Fondation du pont de Moulins.

Plusieurs ponts en pierre ou en bois construits sur l'Allier à Moulins avaient été détruits par les affouillements du sol, lorsque M. de Regemorte fut chargé en 1750, d'exécuter un nouveau pont en maçonnerie.

Pour en assurer la durée, il imagina de l'établir sur un radier général dont nous donnons la coupe ci-dessous.



La grande difficulté de cette fondation a tenu à la nature du sable et à l'abondance des eaux qui s'ouvraient passage à travers ces sables lorsqu'on épuisait.

Ainsi qu'on le voit par le profil ci-joint, le radier de 1m 80 d'épaisseur se trouvait divisé en quatre parties isolées au moyen de 5 rangs de palplanches enfoncées de 5m environ au dessous du fond de la rivière. Les deux rangs d'amont étaient nécessaires pour qu'en cas

d'affouillement à l'amont, le radier sur lequel reposait le pont ne pût pas être attaqué immédiatement et fut défendu par les débris de la partie comprise entre les deux rangs de palplanches.

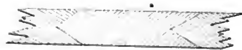
En aval où les affouillements étaient plus à craindre, on avait mis trois rangs successifs de palplanches. Le pont est, comme on le voit fondé directement sur le massif formant radier, sans l'intermédiaire de pieux, et en effet ils sont inutiles puisque le sol est incompressible et qu'il suffit de le préserver des affouillements.

Dans l'exécution du radier, on a eu des opérations difficiles, le battage des palplanches, le dragage et l'exécution de la maçonnerie.

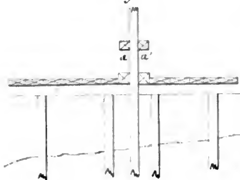
Pour les deux premiers de ces travaux on a suivi deux procédés différents. Dans la première partie du pont on a battu dans l'emplacement entier du radier des pieux d'appontement au moyen desquels on a pu établir successivement sur tous les points des échafauds. Ces échafauds se sont même étendus en amont et en aval du radier au moyen de deux rangs de pieux battus en dehors des limites de ce radier

Ces échafauds servaient à la fois à exécuter le dragage du sable à la profondeur où la fondation doit être descendue et à faciliter le battage des rangs de palplanches.

Pour rendre ces palplanches aussi jointives que possible, et prévenir ainsi l'écoulement du sable par leurs joints, on leur avait donné $0^{m}.135$ d'épaisseur, $0^{m}.37$ de largeur et 7^{m} de longueur.

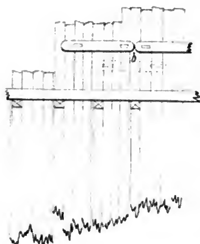


Elles étaient assemblées à grain d'orge, c'est à dire comme l'indique le croquis ci-contre. Engagées ainsi les unes dans les autres



il y avait beaucoup plus de chances pour qu'elles restassent dans un même plan vertical, et il y en avait moins pour que les sables s'infiltrassent par leurs joints.

(1) Dans la première partie où le battage se faisait au moyen des échafauds, les palplanches étaient placées entre deux pièces de bois a a' fixées sur des chapeaux coiffés sur les pieux d'échafaud et interrompus pour le passage des palplanches.



Celles-ci étaient reliées par panneaux au moyen de liernes ou moises mobiles disposées comme l'indiquent les fig 1 et 2. Quelquefois on reliait les panneaux entr'eux par d'autres liernes comme celle indiquée en b par un trait ponctué (fig. 2). Ces liernes avaient des yeux allongés comme sur le croquis.

Pour la mise en fiche les palplanches étaient dressées les unes à côté des autres dans la coulisse formée par les pièces a a' avec le soin de les placer dans une position verticale. Pour les rendre jointives, on se servait d'un crampon à deux pointes (fig. 3) dans lequel les pointes sont évasées, de manière qu'à mesure qu'on l'enfonce dans les deux pièces dont on veut serrer le joint, les trous faits par les pointes sont forcés de se rapprocher.



On se servait, pour le battage, de moutons à base très large. On commençait la mise en fiche par un mouton de 150k, on passait ensuite successivement à des moutons de

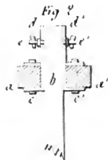
250, de 350 et enfin à un mouton de 750 K. Les sonnettes étaient à tiraudes. Les palplanches étaient parfaitement jointives.

Le dragage se faisait au moyen de dragues à main manœuvrées par des hommes placés sur les échafauds et le produit de leur travail était mené à la brouette dans des bateaux placés en dehors de l'échafaud.

L'exécution des échafauds et le dragage à la main entraînèrent dans des dépenses considérables.

Le dragage, dans la seconde partie du pont, fut fait avec des machines à hottes portées sur bateaux; au lieu de l'être comme dans la première partie, par dragues à main, au moyen d'échafauds. Pour cela on avait pris deux bateaux égaux et recouverts chacun d'une plate forme, laquelle reposait sur des traversines appuyées sur les bords de ces bateaux et se terminait latéralement par deux pièces a, a' (fig. 1). On plaçait les bateaux parallèlement l'un à côté de l'autre et on maintenait les pièces opposées a, a', à une distance égale à l'épaisseur des palplanches au moyen d'une pièce de bois b (fig. 2) reliée aux deux chapeaux a, a' à l'aide d'un boulon à clavette c c' passant dans les étriers c et c' qui embrassaient les longrines a, a' auxquelles ils étaient fixés par les boulons, et qui s'élevaient le long de la pièce b jusqu'en d d'. Ces étriers étaient percés de mortaises verticales allongées de manière que l'un des bateaux pût s'abaisser sans que l'autre suivît le mouvement, mais cependant en restant toujours à la même distance.

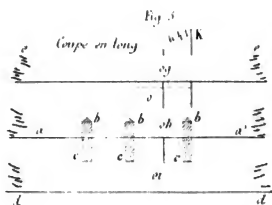




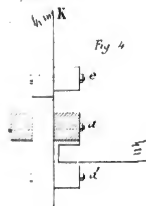
Lorsque les premières palplanches d'une file

étaient battues, on remplaçait la pièce b par une palplanche qui alors était percée d'une mortaise verticale pour permettre le jeu des bateaux.

Après que les rangs de palplanches eurent été battus et que le dragage eut été exécuté, on recépa les deux rangs intérieurs, on coiffa de chapeaux les trois autres, et on régala le fond de l'encaissement; mais il fut impossible d'épuiser, à moins de dépenses extraordinaires. On imagina de diviser les fouilles par cases longitudinales, comme elles l'étaient déjà par cases transversales, et d'échouer dans chacune une plate forme en palplanches jointives après avoir répandu sur le sable une couche uniforme de glaise.



Pour s'assurer de l'égalité de cette couche, on se servait d'une machine qui consistait en un grand chassis dont les pièces longitudinales a, a' (Fig. 3) distantes de 4m étaient reliées par des pièces transversales b, b, b, espacées de 0m.325 les unes des autres taillées en arête à leur partie supérieure et disposées comme un gril. Au dessous de ces pièces transversales étaient suspendues des planches c, c, c, d'une longueur suffisante pour, qu'étant relevées en tournant autour des charnières fixées à la face inférieure des pièces b, elles vinssent obstruer l'intervalle entre ces pièces. Pour fermer et ouvrir ces planchettes, des pièces d d et e e (fig. 3 et 4) étaient placées horizontalement en dessus et en dessous des longrines a, et à égale distance de manière à laisser libre le mouvement des planches c. Ces pièces



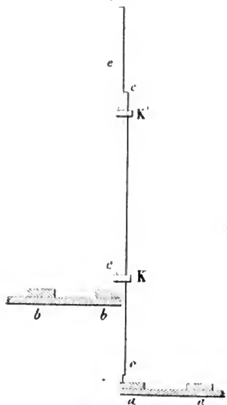
d et e étaient reliées de distance en distance par des pièces comme f, percées par des boulons formant charnières en g h et i. A chacune de ces pièces f était fixé un levier K mobile autour de la charnière h et au moyen duquel on faisait hausser ou baisser à volonté les pièces horizontales d et e et par suite les planches c.

Ainsi au moyen de ce levier on tenait les planches c, c, relevées on les chargeait d'une couche de glaise d'épaisseur uniforme, puis tout-à-coup on relevait les leviers K, de sorte que toutes les planches tournant à la fois, la glaise se répandait uniformément. Cette machine était portée par des bateaux de forme carrée pour la grande case du radier, et par des échafauds pour les petites.

Lorsqu'on avait répandu la glaise, on procédait à l'immersion des plate-formes construites avec des madriers reliés entr'eux par des traverses comme celle que nous avons décrite pour la fondation sur pilotis à peu de profondeur au dessous de l'eau. Seulement les joints étaient aussi étanches que l'on avait pu les obtenir.

Pour immerger les plate-formes on a eu de grandes précautions à prendre pour empêcher un panneau de recouvrir le précédent ou de s'en séparer. (Ces panneaux n'avaient que 4 mètres)

Voici comment on s'y est pris : soit a a un panneau déjà descendu, à ce panneau est attachée une tige c,c fixée par un tirefond, cette tige est maintenue verticalement par une traverse fixée sur deux bateaux entre lesquels se fait l'immersion. A cette tige portant tirefond est fixé un étrier K' placé au dessus du niveau de l'eau. La seconde plateforme b b est maintenue d'un côté par une autre tige à tirefond e e et de l'autre par une tige analogue à cc. La première c c passe dans l'étrier K' et









et porte un étrier K qui la relie à la première tige cc. Par ce moyen quand la plate-forme descend, l'étrier K' reste immobile, tandis que l'étrier K suit le mouvement, et on est assuré que cette plate forme viendra se placer jointivement à la première. Quand elle est descendue et maintenue à fond par un chargement en moellons, on enlève l'étrier K' et on retire la tige cc, mais pour cela il faut pouvoir dévisser le tirefond. A cet effet ce tirefond a la forme indiquée (fig 3) et s'engage dans une mortaise pratiquée dans le pied de la tige où il est maintenu par un boulon a, (Fig. 4) qui permet d'élever la tige à une hauteur suffisante pour la dégager de l'étrier K, et par conséquent de lui imprimer le mouvement de rotation nécessaire pour enlever les vis.

Lorsque les plateformes eurent ainsi été descendues, on épuisa avec des chapelets, et en formant de petits batardeaux sur les plateformes, on parvint à établir la fondation. Mais on voit avec quelle dépense on a dû faire ce travail. Aussi quand il y a dix ans, on a eu à construire le pont aqueduc du Guétin, sur la même rivière, sur le même sol, n'a-t-on pas suivi la même méthode, quoique le système de fondation fut le même.

§ 2. Fondation du pont du Guétin

Au pont du Guétin, on a, comme à Moulins

quatre rangs de palplanches, deux en amont, deux en aval, mais le dragage a été fait plus profondément dans les cases extrêmes que dans celle du milieu, et au lieu de descendre à grands frais des plateformes pour en venir ensuite à épuiser, on a coulé du béton en se réservant une hauteur de 0m40 à 0m60 pour former le passage du radier, de sorte que le travail n'a présenté d'autres difficultés que celles inhérentes au battage des pieux et au dragage.

Toutes ces précautions de fondation ne sont prises, comme nous l'avons vu, que par suite de la difficulté d'enfoncer les pieux dans le sable à une profondeur suffisante pour qu'ils ne soient jamais affouillés. On pourrait peut-être se servir avec succès, pour faire pénétrer les pieux aussi profondément qu'on le voudrait, d'un tube en tôle que l'on enfoncerait comme le font les sondeurs des puits artésiens, c'est-à-dire en enlevant le sable intérieur à mesure qu'on l'enfonce, ce qui ne présente alors aucune difficulté. Lorsque le tube serait descendu à la profondeur voulue, on placerait le pieu dans son intérieur; puis on enlèverait le tube à l'aide des appareils dont se servent les sondeurs. Après cet enlèvement, il est probable que l'on parviendrait à faire descendre encore le pieu en le battant à la sonnette, parceque le sol environnant n'aurait pas été comprimé. Cet enfoncement du pieu coûterait plus cher qu'un battage ordinaire, mais il est probable qu'il donnerait lieu à une grande économie, s'il permettait de supprimer les radiers généraux qui entraînent dans des dépenses considérables.

Ce vœu que nous formions, il y a vingt ans s'est réalisé en 1856, à Lyon, à la fondation du pont de la Guillotière. Plus loin on verra comment on s'y prend maintenant.

Article 6

Article 6.

Fondation sur un sol compressible et affouillable.

Lorsque le sol compressible et affouillable n'a qu'une épaisseur limitée et qu'au dessous se trouve un sol résistant, les fondations s'exécutent sans pilotis, en les descendant jusques sur le terrain résistant. Mais quand le mauvais terrain a une grande profondeur, il est difficile de donner aux pieux la résistance nécessaire; il faut alors prendre plus de précautions dans le battage et disposer la fondation de manière que les affouillements ne puissent pas atteindre le pied des pieux et les déraciner. Il convient surtout de limiter le terrain dans lequel s'exerce la compression produite par l'enfoncement des pieux, afin d'accroître la résistance qu'ils présentent.

Ce qui a été fait à Bordeaux et à Rouen pour les fondations des piles des ponts qui ont été construits dans ces villes, peut servir d'exemple. Dans ces deux localités on avait un sol de vase d'une épaisseur à peu près indéfinie et en même temps une grande profondeur d'eau; on était également gêné par la marée, mais à Bordeaux la vitesse des eaux est dans les crues, plus considérable qu'à Rouen et le sol y est un peu plus vaseux. On a adopté le même système de fondation, mais dans l'exécution il y a eu des différences qui sont dues, tant aux circonstances locales qu'aux vues particulières des Ingénieurs.

La planche XXVII représente les états successifs du travail de fondation des piles au pont de Bordeaux. Les figures 1 et 2 représentent en coupe et en plan la disposition adoptée pour le battage des pieux d'échafaud au moyen d'une

sonnette montée sur bateaux, les fig 3 et 4 font connaître la construction de l'échafaud disposé par cases dans chacune desquelles doit être placé un pieu.

Quoique le battage des pieux dût être facilité par ce grillage, la grande élévation de cette charpente au dessus du fond de la rivière (9m,50) fit penser qu'elle ne suffirait pas pour assurer un bon battage, et on prépara pour être immergé presqu'au niveau du fond un chassis destiné à maintenir et à diriger le pied des pieux. Ce châssis est représenté en coupe et plan dans les fig. 5 et 6. Les fig. 6 et 8 font voir comment les pieux sont placés dans les cases de ce chassis.

Avec la coupe de l'échafaud, fig. 7 on a représenté l'échouage du châssis. Il est pressé par plusieurs aiguilles verticales sur lesquelles on agit au moyen de leviers qui eux mêmes sont mis en mouvement par des moufles.

Les pieux étaient enfoncés avec un mouton pesant 550k et on n'arrêtait le battage que quand l'enfoncement n'était plus que de 0m,05 par volée de 10 coups de mouton tombant de 4 à 5m.

Pour que l'échafaud résistât aux efforts auxquels il pouvait être exposé pendant tout le cours des travaux, il était consolidé par deux croix de St André et par des pièces en décharge représentées, soit dans la coupe que nous venons de décrire, soit dans une élévation spéciale de l'échafaud consolidé, fig: 8.

La figure 9 représente le recépage avec la scie circulaire de Mr Vauvilliers, dont il a été question précédemment. Après le recépage on procédait à l'enrochement à pierres perdues entre les pieux au dessous du plan de recépage. L'immersion des moellons, figure 10, se faisait dans une caisse ou trémie qui restreignait les enrochements à la partie de la fondation correspondante à cette caisse sans fond dont le mouvement

horizontal régalait les moellons en entraînant ceux qui auraient dépassé la tête des pieux.

Dans la figure 11, on voit le caisson flottant et en partie chargé de maçonnerie ; dans les cinq autres suivantes il est représenté avec ses bords exhaussés et la maçonnerie plus ou moins avancée dans son intérieur.

La coupe en long, figure 15 représente des cloisons intérieures destinées à consolider les bords exhaussés et à permettre l'exécution par cases, en maintenant le caisson échoué sur les pieux au moyen de l'eau introduite dans les cases où l'on ne maçonne pas.

On peut remarquer sur plusieurs des figures que l'enrochement est fait entre les pieux de fondation et d'échafaudage et s'étend même au delà. On remarquera également que le caisson a été échoué presque au niveau du fond de la rivière afin de n'avoir pas à exécuter des enrochements trop élevés par suite trop étendus et de ne pas ainsi obstruer la section d'écoulement.

Pour la fondation du pont de Rouen commencée avant celle du pont de Bordeaux, on a également fait usage d'un châssis, pour faciliter le battage des pieux, mais on ne s'en est servi que pour guider les doubles rangs de pieux jointifs qui entourent la fondation de chaque pile.

L'exécution de ce chassis représenté planche XXVIII, figures 1, 2, 3 et 4 a été la première opération de la fondation ; il est formé d'une ceinture de deux cours de pièces de bois parallèles distantes de 2m,40 l'une de l'autre et reliées par des entretoises écartées d'environ 3m. Avant de le construire, on avait préalablement battu les pieux destinés, les uns à le supporter (ils sont alors hachés), les autres à en diriger l'immersion. Comme ces pieux n'avaient pas un grand effort à soutenir, on les enfonçait avec un chasse pieux au moyen duquel on les faisait

descendre à la profondeur voulue. Ceux qui devaient faire partie de l'enceinte extérieure étaient descendus plus bas que ceux de la ceinture intérieure, ainsi qu'on le voit dans les fig. 6. 8 et 9. Pour guider le caisson dans son immersion on avait fixé au chassis des colliers embrassant les poteaux directeurs, ainsi que cela est représenté dans la figure 4. Dans l'immersion de ce chassis il arrivait quelquefois que le frottement contre les pieux directeurs l'empêchait de glisser. On le faisait descendre en frappant quelques coups de mouton sur les aiguilles, au moyen desquelles on agissait avec des palans pour le faire enfoncer. Cette manœuvre est indiquée dans la figure 3.

La troisième opération a été le battage des pieux, tant de la fondation que des deux enceintes; on y employait un mouton de 600 k. tombant de 3m 50. On n'arrêtait le battage des pieux de fondation que quand ils n'entraient que de 0m 10 par volée de 10 coups. Aussi le pont n'a-t-il éprouvé aucun tassement, tandis que l'une des piles du pont de Bordeaux s'est affaissée, à ce qu'il parait de 0m 40 à 0m 50

La quatrième opération a eu pour but la formation d'un enrochement autour des piles et un bétonnage général, tant sur les piles que dans l'enceinte formée par les deux rangs de pieux jointifs. D'après le mode de coulage à la trémie, représenté dans la fig. 7, on doit supposer que le béton a été en grande partie délavé puisqu'il tombait dans l'eau d'une assez grande hauteur au dessus du fond.

Nous pensons qu'un enrochement eut été moins couteux et eut mieux valu. De deux choses, l'une: ou le béton durcit et adhère aux pieux, alors il les charge de tout son poids et nuit par conséquent à la stabilité tant par ce surcroit de poids inutile, que par la facilité qu'il donne aux affouillements de se produire sous sa surface inférieure; S'il ne durcit pas, il vaut moins qu'un enrochement, puisque

ses éléments sont plus petits et plus faciles à entraîner. On dira peut-être que, quoique dur, il n'adhèrera pas aux pieux; nous ne le croyons pas, mais en admettant que cela puisse arriver, l'affaissement ne serait pas uniforme, par conséquent la masse se romprait en morceaux plus ou moins gros et on aurait un enrochement en blocs de béton au lieu d'avoir un enrochement en blocs de pierre.

La cinquième opération a été le recépage avec la scie de Décessart, puis le passage sur la tête des pieux d'une espèce de rabot CD, pour enlever les parties de béton ou les autres corps qui auraient pu se trouver sur ces pieux.

Pendant l'exécution des différentes opérations que nous venons de décrire très-sommairement, on avait construit le caisson, on l'avait mis à l'eau et on avait exécuté dans son intérieur un cube de maçonnerie suffisant pour qu'amené en place, on n'eût qu'à y introduire une faible quantité d'eau pour l'échouer.

Après sa mise en place, le travail s'est fait comme nous l'avons décrit précédemment en parlant des fondations par caisson.

Article 7

Fondation sur un sol indéfiniment compressible

Il se rencontre des terrains d'alluvion de telle nature que les pieux qu'on y enfonce ne parviennent jamais à un refus suffisant pour qu'on puisse leur faire supporter un poids considérable. Ce cas s'est présenté au pont de Cubsac sur la Dordogne; il est général à Rochefort, à Lorient, &c. et en général aux embouchures de toutes les rivières qui charrient du limon vaseux; mais à un degré moins remarquable qu'à

Cubsac.

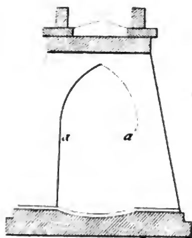
La glaise molle que l'on rencontre en plusieurs endroits en bancs très-épais, a les mêmes inconvénients, et offre, en outre, cette circonstance remarquable que les pieux déjà battus se soulèvent quand on en enfonce d'autres dans leur voisinage, parce que la glaise transmet au loin la compression qu'on lui fait subir. Pour remédier à cet inconvénient, on enfonce les pieux le gros bout en bas.

A Cubsac, on avait à fonder des piles ou des culées. Pour les piles on n'avait d'autre parti à prendre que celui de larder le sol de pieux très-longs, de 12 à 19^m, de recéper et de fonder sur ces pieux avec un caisson. Les pieux sont espacés de 0^m.80 d'axe en axe dans un sens et de 0^m.78 dans l'autre sens; ils ont 0^m.35 à 0^m.45 de diamètre au gros bout et 0^m.20 à 0^m.22 au petit bout. Mais cette fondation n'offrant pas la solidité nécessaire pour supporter les piliers d'un pont suspendu élevés à 30^m au dessus de l'eau, on s'est borné à faire en maçonnerie la partie qui pouvait être atteinte par les crues de la rivière, et on a élevé le surplus des piliers au moyen de colonnes en fonte creuses et découpées à jour. Ce travail a parfaitement réussi, mais comme on le voit, la charge est très-faible. Pour la rendre la plus faible possible, on a donné beaucoup d'empatement à la fondation. Cependant cette charge est encore de 13000^K par pieu.

Les deux culées en maçonnerie ont été fondées de cette manière, mais les pieux portaient 14000 et 15000 K. Quant aux hautes levées destinées à raccorder le pont avec les routes accédant au pont, construites également en maçonnerie, elles ont été fondées sur le sol naturel.

Par des sondes faites avec soin, on avait constaté que le sol supérieur, assez résistant, reposait sur un terrain plus mou et qu'à mesure que l'on s'enfonçait, le sol devenait moins résistant. On s'est donc attaché à profiter de la résistance

des couches supérieures pour y asseoir la fondation.



Mais pour réussir on a dû chercher à diminuer le poids des levées et pour y arriver, on les a percées d'arcades tant dans le sens longitudinal que dans le sens transversal, au dessous de ces arcades règne un radier général disposé en son milieu en voûte renversée comme l'indique la voûte ci-contre. Les arcades sont voûtées en ogives dans les piles et en plein cintre d'une pile à l'autre. Les parements extérieurs sont disposés avec un fruit assez considérable afin de repartir le poids sur une plus grande base.

Cette construction hardie a éprouvé un tassement sensible, mais à peu près uniforme, on s'y attendait puisque le sol était compressible. Maintenant tout l'effet est produit et Mr. de Vergès doit s'applaudir d'avoir osé faire une telle épreuve.

Il avait essayé, pour une partie de son travail, de faire la maçonnerie sur une couche de sable, mais en lui donnant 1m. d'épaisseur il n'avait étendu cette couche qu'à 0m.50 au delà des murs. Il est résulté de cette disposition des inconvénients qui ont fait renoncer à ce mode de fondation.

Le sable employé dans les fondations présente l'avantage de répartir à peu près uniformément sur sa base les poids inégaux dont il peut être chargé, mais en même temps il exerce latéralement une poussée qui se fait sentir à une distance que l'on a trouvée être égale à deux fois l'épaisseur de la couche. Si donc le sable n'a pas réussi à Cubzac cela a tenu probablement à l'effet de cette poussée horizontale.

A la suite des arcades dont nous venons de parler, on a exécuté des levées en terre rapportée. Ces terres pesant plus

que la maçonnerie que nous venons de décrire, ont enfoncé la croûte solide des alluvions, et la vase refluant de part et d'autre a produit des soulèvements de 4 à 5m de hauteur. Ainsi, il est démontré que si M. Vergès n'avait pas autant allégé ses arcades elles se seraient affaissées, et là le dommage aurait été plus grand que dans les remblais où l'on a remédié au mal en rapportant de nouveaux remblais moins pesants que les premiers. C'est-à-dire, en les exécutant avec des moellons calcaires très légers que l'on a rangés de manière à former de petites voûtes grossièrement exécutées, il est vrai, mais disposées de manière à renfermer le plus possible des vides dans la masse.

Chapitre IV.

Construction des Voûtes

Article 1er Cintres

Le levage et la pose des pierres employées dans la construction des piles et des culées peut se faire au moyen des machines et des procédés dont il a été question précédemment. Cependant je dois dire qu'en général, lorsqu'on construit un grand pont, il est nécessaire pour l'approche des matériaux d'établir un pont provisoire en bois. Nous en verrons la construction plus tard.

La pose des voûtes nécessite l'exécution d'une charpente spéciale que l'on nomme cintre. Le cintre est destiné à recevoir et à soutenir les voussoirs ou claveaux de la voûte au moment

de leur pose ; il y a, par conséquent, à la partie supérieure, une forme qui doit être concentrique à celle de la voûte.

On construit les cintres suivant deux systèmes. Ils sont fixes ou retroussés. Les premiers sont invariables de forme. Les seconds sont susceptibles de céder plus ou moins à la pression, et de changer de forme suivant qu'ils sont chargés sur une étendue plus ou moins considérable.

§. 1er. Cintres fixes.

Pour rendre les cintres fixes, il faut les disposer de manière que l'inégalité de pression ne puisse pas, malgré la flexibilité du bois, opérer un changement dans la forme. Dans les petits ponts, cette rigidité s'obtient au moyen de deux planches inclinées aa', Pl. XXIX butant l'une contre l'autre. Ces planches, arrondies suivant la courbure de la voûte et désignées sous le nom de veaux, sont soutenues par des chandelles bb', reposant sur des semelles cc'. Ordinairement, lorsque l'on construit un ponceau, et toujours quand on exécute un égout, on cloue sur deux ou trois veaux consécutifs des planches formant couchis et destinées à supporter la voûte pendant sa construction. Pour faciliter le décintrement on interpose entre les veaux et les chandelles de petits coins dont l'enlèvement décharge le cintre du poids de la voûte.

Pour les ouvertures en plein cintre de plus de 2m et jusqu'à 15m environ, on emploie les formes représentées fig 2, 3, et 4.

Au pont de Sèvres, on a employé le cintre indiqué Pl. XIV

Enfin, pour les très grands ponts, on peut adopter celui du pont Napoléon sur le Gave de Gavarnie à St Sauveur, exécuté sur un de nos croquis, fig. 5, Pl. XXX.

Si l'on n'avait pas pu se procurer les longs arbalétriers en une seule pièce, on les aurait composés de plusieurs pièces croisées.

Mais ce dernier cintre n'aurait pas convenu si le lit du Gave n'avait pas une énorme profondeur (63^m), et si l'on avait pu y trouver des points d'appui.

Dans les cas ordinaires, il convient d'adopter un cintre reposant sur plusieurs points d'appui, comme dans les figures 6 et 7, Pl XXIX et XXX, fig. 3. Les points d'appui isolés du premier (Pont de Moulins) ont été pris sur le radier général. Ceux du second (Pont de Plessis-les-Tours) sont de très forts pieux battus avec un lourd mouton.

Dans tous ces cintres, excepté dans ceux de 7 à 8^m au maximum, on relie les différentes fermes composant le cintre d'une voûte par des moises horizontales et par des croix de St André appliquées contre les poinçons (Voir fig. 4, 5, 6 et 7. Pl XXIX)

Au pont d'Iéna à Paris, on avait d'abord préparé un cintre retroussé analogue à ceux des ponts exécutés par Péronnet. Mais avant de le monter on a reconnu les inconvé-nients inhérents à ce système et on pris le parti de le rendre fixe, au moyen de deux palées construites sous chacune des voûtes (Pl XXIX, fig. 8.) Ce système est essentiellement vicieux.

§.2. Cintres retroussés

Le cintre retroussé, est formé de plusieurs cours d'ar-balétriers dont les abouts s'appuient sur des moises pendantes qui servent en même temps à relier entr'eux les divers cours de voussoirs d'une même voûte.

Les articulations de l'un ne correspondent pas à celles de l'autre. Dans ce système suivi au pont de Neuilly et commencé au pont d'Iéna, fig. 13, lorsque l'on pose les voussoirs des reins

les parties inférieures fléchissent et les parties supérieures s'exhaussent, au point qu'il y aurait rupture si l'on ne chargeait pas le sommet de manière à empêcher le soulèvement.

A l'époque de la construction des grands ponts exécutés par M. Péronnet, on n'a pas employé d'autres cintres. On était persuadé que ces oscillations étaient nécessaires pour amener les ponts à l'état d'équilibre stable. Il est cependant manifeste que la variation de forme ajoutait une très-grande difficulté à la construction et qu'elle ne servait à rien, car la voûte n'agit comme voûte qu'au moment où elle cesse de porter sur les cintres.

Au pont de Neuilly, le chargement effectué sur le sommet du cintre a été porté jusqu'à 455.000 K^os^.

Il résultait des oscillations continuelles dans la forme des cintres :

1°. La nécessité de laisser de grands joints dans les parties sujettes au mouvement.

2°. Le non durcissement du mortier qui ne prenait aucune adhérence avec les pierres, de sorte que lorsqu'on enlevait les cintres, il s'opérait un tassement considérable (de 0,^m^66 au pont de Neuilly)

3°. L'emploi d'une quantité de bois beaucoup plus grande que pour les cintres fixes.

4°. Enfin, comme on l'a dit, un embarras continuel pour charger, décharger les sommets et par suite une très-grande difficulté dans la pose des voussoirs. L'autorité de Péronnet seule a fait durer ce système qui n'est bon que dans les rivières trop profondes pour battre des pieux, ou sujettes à des crues qui produisent des affouillements dangereux, et encore, dans ce cas, on peut adopter le système de la figure 5.

Au pont de Bordeaux on a employé un système

qui peut également trouver d'utiles applications quand on exécute des ponts de moyenne ouverture, 20 à 25m sur des rivières ou navigables ou sujettes aux marées et présentant un grand nombre d'arches Pl XXX. On avait établi des parties fixes près des piles et on plaçait sur ces parties fixes un closoir à articulations qu'on établissait sur deux bateaux et que l'on mettait en place avec deux chèvres. Les parties fixes étaient supportées par les pieux d'échafaudage; la partie mobile était formée de six rangs d'arbalétriers. Celui inférieur n'était que de deux morceaux, et les autres de 3 ou 4. Il y avait par conséquent peu de mouvement à craindre. Le closoir se montait et se démontait pour servir à plusieurs arches.

Cette disposition était motivée:

1° Par la difficulté d'établir des appuis intermédiaires solides dans une rivière à fond de vase

2° Par les inconvénients qu'aurait produits, sur une rivière navigable, sujette à la marée, l'obstruction des arches

§.3. Considérations générales sur les cintres

Quelque soit le système des cintres que l'on adopte, il faut:

1° Si les piles n'ont pas l'épaisseur nécessaire pour faire culée, cintrer toutes les arches à la fois, pour les construire simultanément ou détruire la poussée horizontale par des tirants ou enfin voûter plusieurs arches à la fois en partant d'une des culées et diminuer progressivement ou enfin voûter plusieurs arches à la fois en partant d'une des culées et diminuer progressivement le nombre des voussoirs sur chaque arche à partir de cette culée.

2° Laisser un intervalle entre le dessus des arbalétriers

courbes ou veaux et l'intrados de la voûte pour recevoir les couchis. Cet intervalle sera de 0m.15, 0m.20, ou même 0m.30 pour les voûtes très-épaisses en pierre de taille, et moindre pour celles en moellons. Les couchis sont des pièces horizontales qui reposent sur les différentes fermes dont le cintre est composé et auxquelles on donne un équarrissage suffisant pour supporter le poids de la portion de voûte qui correspond à chacun d'eux.

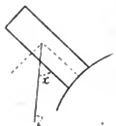
3°. Réunir les fermes non seulement par des moises horizontales, mais encore par des contrevents ou pièces placées diagonalement d'une ferme à l'autre.

Les fermes sont espacées plus ou moins, suivant la grosseur des bois avec lesquels elles sont construites, et suivant la grosseur des couchis. Dans les ponts construits par Perronnet, elles étaient éloignées, savoir:

de 1m.79	à Cravant (Anse de panier)	Arbalétriers	0m.22 à 0,25	(un peu faibles)	Ouverture	39m.50
de 2m.27	à Nogent ...... id	id	0.38 à 0.48	(trop fortes)	...... id	29.20
de 2m.19	à Manter ...... id	id	0,38 à 0.40		id	39.00
de 1m.95	à Neuilly ...... id	id	0.38 à 0.46		id	39.00
de 1m.	à St Sauveur (Arc de cercle)	id	0.30 à 0,30		id	23.38

Lorsqu'on a un grand pont à construire, il est important de proportionner la force des cintres à la charge qu'ils auront à supporter. Pour y parvenir il faut calculer le poids dont les cintres seront chargés, lorsque tous les voussoirs moins la clef seront mis en place. On observera pour cela que les voussoirs inférieurs sont soutenus entièrement sur la pile ou la culée par l'effet du frottement. On sait que le frottement est les 0.76 de la pression entre deux pierres posées avec mortier. On calculera donc pour chacun des voussoirs supérieurs au plan de glissement la partie du poids qui se

reportera sur le cintre. Pour cela, supposons P le poids du voussoir; la composante suivant le plan de joint sera $P \cos \alpha$, la composante perpendiculaire au plan de joint produisant la pression $P \sin \alpha$, par suite un frottement agissant en sens inverse de la composante $P \cos \alpha$ et égal à $0.76\, P \sin \alpha$, ainsi l'effet qu'exercera le voussoir sur le cintre sera $P(\cos \alpha - 0.76 \sin \alpha)$



On fera ce calcul pour tous les voussoirs supérieurs à celui qui sera placé de manière que l'on ait $\cos \alpha - 0.76 \sin \alpha = 0$ Au dessous de ce point le cintre n'aura rien à porter.

Si l'on voulait avoir complètement égard à toutes les forces développées pendant la construction d'un pont, il faudrait en partant du voussoir retenu par le frottement sur son plan de joint, calculer les forces normales à l'intrados et au plan de joint, et combiner ces forces successives entr'elles pour arriver à connaître l'action de la voûte sur le cintre, suivant que celui-ci est chargé du poids de un, de deux, de trois &c., cours de voussoirs. Mais en combinant les pressions agissant dans des directions plus ou moins inclinées, le frottement qu'elles produisent et le poids des voussoirs, on trouverait que ces forces en reportant une partie du poids sur les piles ou culées, diminuent la charge des cintres. On sera donc sûr d'avoir un cintre d'une force suffisante en supposant qu'il a à supporter pour chaque voussoir le poids donné par la formule $P(\cos \alpha - 0.76 \sin \alpha)$

Art. 2. Détails relatifs à la construction des voûtes.

§ 1er Appréciation du tassement pour tracer la courbe de pose.

Pour qu'une voûte après son complet achèvement ait la forme donnée pour le projet, il est nécessaire de prévoir le

tassement qu'elle éprouvera pendant la construction et après le décintrement quand les voussoirs réagiront les uns sur les autres.

Le tassement qui a lieu pendant la construction est dû au tassement du cintre seul, il est d'autant plus considérable que le nombre des articulations est plus grand, car une pièce se resserre peu sur elle-même dans le sens de sa longueur et le tassement n'a lieu que par la pénétration qui se fait des fibres dures d'un morceau dans les fibres molles de celui contre lequel il butte, ou par la compression et le retrait dans le sens de l'épaisseur. Comme il est difficile de calculer la profondeur de cette pénétration des fibres, il vaut mieux la prévenir entièrement; c'est ce que l'on obtient en plaçant dans les joints des pièces qui s'appuient les unes sur les autres, des plaques de métal non facilement oxidables. Au pont de Grenelle, où l'on en a fait usage à la jonction des abouts des courbes et où il n'y avait pas de pierres pressées latéralement, aucun tassement n'a eu lieu, et comme on avait compté qu'il s'en produirait un, le pont s'est trouvé disposé avec pentes et contrepentes au lieu d'être horizontal. L'épaisseur des plaques en cuivre était de 0^m^0008.

Lorsque l'on a établi un pont de service sur un cintre fixe, la grue roulante se place sur un pont au dessus duquel elle ne s'élève que de la hauteur nécessaire pour envelopper le binard. Elle peut ne se composer que du treuil reposant sur deux pièces de bois placées en travers du pont et reposant sur des rails; Ces pieux n'ont pas besoin d'être armés fortement, parcequ'il est facile d'empêcher leur flexion, pendant la pose d'un cours de voussoirs, en prenant des points d'appui sur le cintre.

Le tassement qui a lieu après le décintrement est la conséquence de la compression du mortier des joints. Si ce mortier n'a pas encore pris corps au moment où la voûte est —

abandonné à elle-même, il se comprime, l'arc d'intrados diminue et parconséquent la clef s'abaisse. Lorsqu'on ne connaissait pas le moyen de faire partout de bons mortiers, que l'on employait de la chaux grasse, le tassement était évidemment plus grand que si l'on avait employé du mortier durcissant en peu de jours.

Voici quelques exemples de tassements observés :

Au pont de Nemours, arc de cercle de	16m.20 de largeur,	le tassement a été de	0m.203
.... Nogent, anse de panier de	29m.25	.... id	0m.446
.... Neuilly ...... id	39m.00	.... id	0m.660
.... Mantes ...... id	39m.00	.... id	0m.557
.... St Sauveur ...... id	23m.38	.... id	0m.221
.... Iéna, arc de cercle de	28m.00	.... id	0m.120

Il parait qu'au pont de Rouen, le tassement a été peu considérable parceque les joints étaient faibles et le mortier excel-lent. On voit d'ailleurs par le tableau qui précède, qu'aux ponts de St Sauveur et d'Iéna le tassement a été beaucoup moindre qu'aux ponts construits antérieurement.

D'après les calculs de Mr de Prony, sur le pont de la Concorde, le resserrement des joints aurait été de 0m.001 en suppo-sant qu'il eut été uniforme. Mais c'est ce qui n'arrive pas, puisque les joints à l'intrados près de la clef, s'ouvrent, tandis que ceux qui avoisinent les naissances se resserrent. En considérant successivement les efforts qui ont lieu sur les plans de joint et déterminant ceux qui sont comprimés à l'intrados et ceux qui ne le sont pas, on pourrait apprécier la compression totale, connaissant par des expériences la compressibilité du mortier que l'on emploierait. D'après cela, on calculerait le tassement probable et on y aurait égard dans le tracé de la courbe de pose. On a quelquefois évalué la compression sur le mortier à

0m.000125 par kilogramme de pression exercée sur un centimètre carré.

Mais les expériences faites à ce sujet sont antérieures à l'emploi de la chaux hydraulique et des cintres fixes et on ne doit plus s'appuyer sur ces résultats.

Lorsque les joints sont faits en très-bon mortier et que les cintres n'éprouvent aucune déformation sous la charge, le tassement est très-faible.

Au pont Louis Philippe, construit en 1861, il a varié de 0m.014 à 0m.031 au sommet des arches, et 0m.009 à 0m.012 dans les reins.

On doit avoir égard au tassement lorsque l'on trace la courbe de pose qui doit servir, tant à la taille et au levage des cintres qu'à la mise en place des voussoirs, puisqu'elle est calculée pour que le pont ait, après le décintrement, la forme indiquée par le projet. C'est au contraire sur la courbe réelle de la voûte que l'on fait les panneaux en bois ou en feuilles de métal nécessaires pour la taille des voussoirs. Ce travail de taille doit être fait avec le plus grand soin, afin de pouvoir réduire, autant que possible l'épaisseur des joints, et de diminuer par conséquent le tassement. La bonne épaisseur est de 0m.008.

§. 2. Pose des Voussoirs

Pour amener les voussoirs en place, il faut les prendre dans le chantier, les transporter sur le pont de service et les descendre dans l'emplacement qu'ils doivent occuper.

Le transport s'opère au moyen d'une voiture à deux roues nommée diable ou binard, laquelle est manœuvrée par des ouvriers nommés bardeurs d'où vient l'expression de bardage appliquée au transport des pierres de chantier sur le tas.

Pour que l'approche ou le bardage des matériaux

se fasse promptement et facilement, il faut que les pierres soient rangées dans le chantier de taille de manière que deux lignes de pierres soient toujours séparées par un chemin, afin que l'on puisse arriver près de celles de ces pierres que l'on veut enlever, sans avoir à en déranger d'autres.

Il faut aussi que l'appareilleur ou celui qui est chargé de diriger la taille et la pose ait un plan de son chantier sur lequel l'emplacement et la marque de chaque morceau soient rapportés, afin que l'on sache où gît le morceau dont on a besoin. Dans un pont, tous les voussoirs d'un rang portent une lettre et un numéro d'ordre afin que chacun se trouve bien à la place qu'il doit occuper et que les joints se croisent convenablement d'un cours de voussoirs aux deux contigus.

Pour arriver jusque sur le cintre, lorsqu'il est fixe, on établit un pont de service qui repose sur le cintre même au moyen de poteaux verticaux, de sorte que pour mettre les voussoirs en place il suffit d'ouvrir le plancher du pont au dessus de l'emplacement qui leur est assigné et les descendre au moyen d'une chèvre double sous laquelle le binard est venu se placer. Cette manœuvre a été faite avec une assez grande facilité au pont d'Iéna, comme au pont de Moulins. Lorsque le binard était amené sous la chèvre, on brêlait le voussoir avec une corde en garantissant les arêtes au moyen de paillassons, on l'enlevait avec la chèvre, puis le binard étant retiré on ouvrait le plancher et l'on faisait descendre le voussoir. S'il n'était pas bien placé, comme la chèvre reposait sur des galets, on pouvait la faire avancer ou reculer et amener ainsi le voussoir à sa place même. Les chèvres à double engrenage étaient munies de déclics très-solides pour qu'il n'arrivât pas d'accidents par l'effet de la chute d'une pierre. Au fur et à mesure que la voûte s'avance, on supprime les montants du pont de service et on les remplace par des pièces croisées reposant sur la partie

de la voûte déjà faite. Lorsque le cintre est retroussé, on ne peut pas placer le pont de service au dessus de la voûte, il faut alors le construire à côté. Dans ce cas, on amène les pierres sur le pont de service et on les fait descendre de là sur les cintres au moyen de pièces inclinées et de rouleaux. On sent du reste que cette manœuvre est difficile, dangereuse et coûteuse.

Dans la construction de plusieurs grands ponts, on a fait usage pour amener les pierres en place d'une grue roulante Pl.XXXI. fig 1 et 2, reposant un peu au dessus des eaux moyennes, sur deux petits ponts de service portant un chemin de fer, et dont l'un est assez large pour permettre la circulation du binard servant au transport des pierres.

Cette grue composée de deux poutres armées supportées par des fermes verticales, enveloppe entièrement le pont à construire et sert non seulement au levage et à la pose des voussoirs, mais à celle des pierres employées dans la construction des piles.

Les fermes servant de supports aux poutres armées sont composées de deux montants placés respectivement sous les poutres et des semelles, moises et contrefiches nécessaires pour les consolider. L'assemblage des poutres et de leurs supports est indiqué fig. 1 et 2.

On élève les pierres de plusieurs manières. Dans la construction de quelques ponts on s'est servi de deux treuils placés à la partie inférieure des supports et dont les cordes passent d'abord sur deux poulies fixées au sommet de ces supports, puis, sur deux autres poulies adaptées à un chariot roulant, au moyen de galets, sur les poutres armées, et enfin dans la gorge d'une poulie mobile dont la chappe porte le crochet servant à la suspension des pierres. fig. 1.

Lorsqu'une pierre ainsi enlevée de dessus le binard est arrivée à la hauteur convenable, l'un des treuils agit pour tirer la corde, tandis que l'autre la lâche, par un mouve-

mouvement égal. Le chariot marche ainsi dans la direction où la corde l'appelle et fait arriver ainsi la pierre au dessus de la place qu'elle doit occuper

La grue elle-même est déplacée au moyen de deux petits treuils dont le pignon mené par une roue à manettes, engrène dans une roue dentée accolée à l'un des galets qui devient ainsi roue motrice.

Dans les grues plus récemment construites, on place un seul treuil roulant sur les poutres armées, fig. 3 et 4. Cette machine que l'on a fait mouvoir, soit avec un treuil à manettes analogue à ceux qui servent à faire marcher la grue, soit au moyen d'un petit engrenage avec roue d'angle remplaçant la roue à manettes, sert à soulever les pierres et à les mettre en place après les avoir prises sur le chemin de service peu élevé au dessus des bateaux sur lesquels repose la grue.

Pour poser un voussoir, on le soutient au moyen d'un coussin placé sous le milieu de la face de douelle et calé avec des coins; par ce moyen, on peut, sans endommager les arêtes, abattre un voussoir et le relever. Autrefois on ajustait chaque voussoir sur l'assise précédente au moyen de cales à l'aide desquelles on l'amenait dans la position assignée par l'épure; puis on garnissait intérieurement le joint avec le voussoir posé au moyen de corde détordue et on remplissait le vide avec du mortier demi-fluide. Il arrivait nécessairement que ce mortier en perdant l'eau surabondante, diminuait de volume et donnait ainsi lieu à un tassement; d'un autre coté, ce mortier délavé ne prenait jamais la même dureté qu'un mortier bien fait et devenait par là une nouvelle cause de tassement. Pour diminuer cet inconvénient,

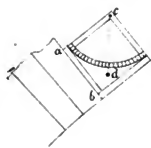
au lieu de remplir le joint avec du mortier délavé nommé coulis, on le garnit du mieux possible

avec de bon mortier que l'on fait pénétrer avec une fiche à dents. Pour les voussoirs inférieurs on peut présenter le voussoir pour reconnaître la position qu'il doit occuper, calibrer avec des règles en fer l'épaisseur du joint, mouiller le joint du voussoir posé et celui du voussoir à poser, appliquer sur le premier une couche de bon mortier à laquelle on donne, au moyen de règles en fer, l'épaisseur voulue et enfin abattre le voussoir sur le mortier ainsi préparé. Si le joint supérieur ne revient pas bien avec l'épure, on le corrige.

Pour que chaque voussoir ainsi mis en place occupe la position qui lui est affectée, on détermine sur l'épure de pose les abscisses et les ordonnées de toutes les arêtes inférieures des voussoirs et l'angle que chaque plan de joint fait avec la verticale. Si le cintre est fixe, on trouve sur le cintre même les points auxquels on peut rapporter la position des voussoirs; si le cintre est mobile, on prend des repères sur les pieux de l'échafaud.

Quand on a reconnu la position de l'arête d'un voussoir, il faut encore s'assurer s'il a l'inclinaison qui lui assigne sa position déterminée par l'épure faite en grand. Pour cela on se sert d'un quart de cercle (Fig 1); on applique le côté a b contre la face du voussoir à poser et l'on voit, par l'angle que marque le fil à plomb c d si le plan de joint du voussoir a l'inclinaison voulue.

Fig. 1



A chaque cours de voussoirs on ne vérifie que ceux des têtes. On pose l'un à demeure et l'on fixe le second sur cales seulement. Tous ceux à poser dans l'intervalle sont placés en se guidant sur ces deux là. Celui de tête qui n'a été que présenté se pose après tous les autres.

Jamais on ne taille l'extrados des voussoirs; on

attend pour cela que le décintrement soit fait et le tassement opéré.

Les voûtes du pont de Neuilly étaient formées de chaque côté de la clef de 56 cours de voussoirs, en tout 113. Les cintres étaient retroussés.

Lorsqu'on eut posé les 18 cours inférieurs le joint du dernier cours formait avec l'horison un angle de 50°30' et parconséquent les cintres supportaient déja une partie du poids de ces voussoirs. Pour empêcher les cintres de se relever à la clef, on fut obligé de le charger d'un poids de 127.000^{K}.

Comme de raison la pose des voussoirs se faisait régulièrement sur les deux parties de la voûte, afin qu'il y eut équilibre entre les pressions exercées par le poids des voussoirs. Il arriva, à l'une des arches, que par la faute des ouvriers on posa deux cours de voussoirs de plus d'un coté que de l'autre on remarqua de suite que le cintre avait été repoussé du côté opposé, mais cet effet disparut dès que la pose eût rétabli l'équilibre entre les deux actions opposées.

On ne manquait pas, à mesure que la pose des voussoirs s'effectuait de charger les cintres en leur milieu. Ce chargement se faisait avec les voussoirs à employer les derniers dans la construction des voûtes, c'est-à-dire avec la clef et avec ceux qui en étaient progressivement les plus voisins. Ces voussoirs étaient séparés par des cales afin de permettre le maniement facile des pierres et de prévenir les épaufrures.

On a cessé la surcharge quand la pose est parvenue au 34e cours de voussoirs faisant avec l'horizon un angle de 78° Le poids posé sur les cintres était alors d'environ 420.000^{K}. Dans cette position on remarqua que les six fermes intermédiaires des cintres s'étaient affaissées de (2^{p} ½) 0^{m}068 de plus que les deux fermes de tête qui, en effet ne supportaient qu'un poids moitié de celui qui pesait sur les autres.

Pour égaliser le tassement, on chargea chacune des fermes de tête seule de huit blocs de pierres pesant 17600^k. mais on ne parvint ainsi à les faire baisser que de 0^m.0135, on fut donc obligé pour que la voûte fut cylindrique de mettre des cales plus épaisses au dessus du couchis sur les fermes intermédiaires que sur celles de tête.

Pour éviter pareil inconvénient, il convient de donner plus de force aux fermes intermédiaires ou de les écarter moins.

Lorsqu'on est arrivé à n'avoir plus que 13 cours de voussoirs à poser, on a mesuré exactement le vide à remplir entre les voussoirs et on l'a divisé en 13 pour avoir l'épaisseur des deux voussoirs à poser. Après la pose de ceux-ci on a fait la même opération et ainsi jusqu'à la clôture de la voûte, parce que le mouvement continuait toujours. Au pont de Choisy, pour avoir négligé cette précaution, on est arrivé à avoir un voussoir de moins, de sorte qu'il y a un joint à la clef. Dans d'autres ponts, les voussoirs voisins de la clef sont sensiblement plus minces que les autres, ce qui est d'un effet très-désagréable.

Les voûtes fermées, on plaça avant le décintrement les assises des timpans jusqu'au ressaut du 21e cours de voussoirs, afin que, quand la poussée agirait, les reins fussent contrebutés les uns par les autres.

Avec les cintres fixes ces difficultés disparaissent, et c'est un des motifs qui ont fait abandonner les cintres retroussés.

§.3 Décintrement

Le décintrement ou enlèvement des cintres se fait de différentes manières suivant le mode de construction des voûtes. Lorsqu'elles sont exécutées en pierres de taille, et que le milieu des voussoirs repose sur des couchis avec cales en dessus

et en dessous, on peut décintrer en enlevant successivement les couchis après avoir fait successivement sauter les coins. Cette opération se fait de deux manières essentiellement différentes, suivant que les cintres sont fixes ou retroussés.

Dans le 1er cas, on enlève d'abord les couchis à la clef, dans le second on commence au contraire par les couchis inférieurs. Si l'on agissait autrement, c'est-à-dire, si l'on décalait les cintres fixes par le bas, les voussoirs de la clef resteraient soutenus pendant que les autres agiraient de tout leur poids et le tassement se ferait instantanément au moment de l'enlèvement des derniers couchis. Par la méthode contraire, le poids de la clef agit d'abord sur les deux contre-clefs, puis sur les voussoirs suivants, et ainsi de suite de la manière la plus régulière sans qu'il puisse y avoir de secousse.

Avec les cintres retroussés, si l'on enlève les couchis inférieurs le cintre se relève légèrement dans le bas, pendant qu'il s'affaisse, s'il y a lieu dans le haut, de sorte que la voûte opère son tassement progressivement et sans secousse.

Lorsque les voûtes sont construites directement sur les couchis sans cales il faut nécessairement faire descendre le cintre entier pour le décharger du poids de la voûte. Autrefois on obtenait ce résultat, en détruisant les abouts inférieurs des arbalétriers aux points où ils reposent sur les points d'appui, de manière à en déterminer l'écrasement progressif, mais on a renoncé à l'emploi de ce moyen qui n'était pas sans danger, pour en adopter d'autres préférables.

On a d'abord interposé entre le cintre et ses points d'appui de doubles coins disposés en sens contraire et préalablement suiffés pour faciliter le glissement (Voir les fig. 3 et 4 de la Planche XXX.)

Il convient, lorsqu'on emploie ce moyen, de ne pas s'exposer à faire échapper les coins tout d'un coup; pour cela

au lieu d'enlever entièrement les taquets qui les maintenaient pendant la construction de la voûte, on détruit, petit à petit ces taquets, puis on fait glisser les coins pour recommencer successivement la même opération

Ce moyen est surtout applicable avec les cintres à entraits et à des arches au dessous de 20m. construites sur des cintres fixes. Si on l'appliquait sans modification dans les grands ponts, on pourrait craindre qu'il ne se produisît une force vive qui pourrait avoir des conséquences fâcheuses.

Mr. Beaudemoulin a employé pour décintrer les ponts de la Vienne et de la Creuse, sur le chemin de fer de Tours à Bordeaux, un moyen qui lui a bien réussi avec des cintres fixes. Il a intercalé entre les semelles des points d'appui et celle des cintres des cales rectangulaires en sapin de 20 à 30 centimètres de hauteur, posées debout, et a soutenu ainsi les cintres pendant la construction des voûtes. Au moment du décintrement il a placé à coté de chacune de ces billes un sac en très forte toile, bourré de sable sec, et après les avoir posés sur des planches creuses, il les a serrés avec des coins; cela fait, il a détruit les cales en les coupant en biseau, et a ainsi fait porter tout le poids sur les sacs qu'il a ensuite vidés également et progressivement au moyen d'ajutages à ce destinés.

Au pont d'Austerlitz on a employé ce mode de décintrement, mais après l'avoir modifié de la manière la plus ingénieuse. Les sacs ont été remplacés par des cylindres en tôle dans lesquels on a introduit un cylindre en bois, lequel porte sur le sable renfermé dans l'enveloppe en tôle. L'appareil se met en place au moment du levage des cintres de sorte que l'on a supprimé les billes dont la destruction présentait de la difficulté et même des dangers. planche XXIX fig. 9, 10 et 11.

Pour obtenir l'abaissement du cintre, on fait échapper

le sable par quatre orifices percés à la partie inférieure du cylindre, et on arrive ainsi à régler parfaitement l'affaissement du cintre sur ses points d'appui, en enlevant la même quantité de sable dans chaque cylindre.

Art. 3. Voûtes en décharge Chappe &c.

§1. Voûtes en décharge

Dans les ponts composés de plusieurs arches consécutives en plein cintre ou en anse de panier, ou même en arc de cercle avec une flèche de plusieurs mètres, il y a intérêt à ne pas charger inutilement les piles en remplissant les reins de maçonnerie; on les évide généralement en établissant des voûtes en décharge dirigées dans le sens longitudinal du pont et auxquelles on donne 1m.20 à 1m.50 de largeur. Elles sont soutenues sur des piédroits de 0m.40 à à 0m.50 excepté du côté des têtes où les tympans ont environ 1m.

Lorsque les ponts sont en plein cintre d'un grand diamètre, on relie les tympans lorsqu'ils ont plus de 3m de hauteur par plusieurs étages de voûtes et par des tirants en fer noyés dans la maçonnerie.

Dans les ponts horizontaux d'une longueur trop considérable pour que l'on puisse donner un écoulement longitudinal aux eaux pluviales, soit sur le pavé du pont, soit en dessous de la forme, au lieu d'établir un plan de pente uniforme, depuis l'arche du milieu la plus élevée, jusques sur les culées, on dispose l'extrados de chaque voûte suivant deux plans inclinés, en sens contraire, desquels on

on fait arriver deux autres plans inclinés partant de l'axe de la pile. On forme ainsi sur les reins des voûtes des espèces de ruisseaux auxquels on donne également quatre pentes en sens inverse pour avoir deux points bas à l'aplomb des ruisseaux du pavé. Dans ces points bas, on encastre dans la voûte des tuyaux portant bride à la partie supérieure et disposés de manière que cette bride soit recouverte par la chappe dont nous allons parler. Un autre tuyau part de la chaussée pavée pour aboutir dans le premier sans y être ajusté, afin que les eaux provenant du pavé du pont et celles qui filtrent au dessous retenues par la chappe, trouvent issue par ces tuyaux dont l'orifice est recouvert par un chapeau en fonte formant crapaudine.

Maintenant on fait souvent descendre les plans inclinés jusqu'à l'aplomb de l'axe des piles et on place les tuyaux de décharge dans l'axe même de la pile, en recourbant leur extrémité inférieure de manière à faire dégorger les eaux en bas d'une des faces de la pile.

§. 2. Chappe

La chappe dont nous venons de parler est appliquée sur l'extrados de la voûte, après que l'on a régularisé les pentes avec de la maçonnerie de remplissage. On lui donne ordinairement 0m. 10 d'épaisseur. Elle est construite en béton de chaux hydraulique, et ne s'exécute que quand on peut supposer que la voûte décintrée a éprouvé tout son tassement. Malgré cette précaution, il arrive ordinairement que la chappe se fend et que l'eau s'infiltre dans les voûtes.

L'Emploi du bitume remédie à cet inconvénient. Une couche de 0m.015 à 0m.020 d'enduit en bitume

naturel bien employé, arrête en général toute espèce de filtration

Deux couches plus minces de 0m.022 à 0m.024 d'épaisseur ensemble, faites avec soin et en croisant les joints ont eu le plus grand succès.

Pour faciliter l'écoulement des eaux infiltrées sous la forme du pavé, il convient de placer sur la chappe des cailloux, puis du gravier, et sur le gravier le sable que doit recevoir le pavage.

§.3. Ouvrages accessoires

Les trottoirs parapets &c.a s'exécutent sans difficulté et nous n'en parlerons pas. Quand ils sont terminés, on ragrée tous les parements au moyen d'échafauds volants analogues à ceux représentés Planche XV.

3.e Section

3e Section

Ponts en Charpente.

Les ponts en charpente sont composés de traverses supportées soit par des palées ou culées en bois, soit par des piles ou culées en pierre. Le choix à faire entre les différents systèmes de charpente imaginés pour la construction des travées dépend, pour les supports, de l'importance de la communication sur laquelle le pont doit être établi; de la nature du sol, de la hauteur du passage au dessus du niveau de l'eau, enfin de la cherté des bois comparée à celle de la pierre. On doit avoir égard surtout aux glaces que la rivière peut charrier, et dont les effets sont quelquefois tels que les palées ne peuvent y résister.

Quant au choix dans la forme des travées, elle est subordonnée à leur ouverture, aux dimensions des bois dont on dispose, et au goût du constructeur. L'ouverture des travées est elle-même déterminée, soit par les exigences de la navigation, soit par la difficulté d'établir les palées ou les piles, soit par l'obligation de laisser aux glaces un passage assez considérable pour n'avoir pas à redouter l'effet de leur accumulation contre ces points d'appui.

Nous allons décrire les formes les plus usitées dans la construction des palées et des travées.

Art. 1er

Art. 1er. _ Palées et culées en charpente.

§.1 Palées

Les palées les plus simples sont celles qui ne se composent que d'une seule ligne de pieux perpendiculaire à la direction du pont, et recouverte par un chapeau sur lequel repose directement la travée. Cette disposition peut être adoptée sur un cours d'eau qui n'est sujet ni à des crues, ni à des débacles, et sur lequel il n'y a pas de navigation. Dès que la palée peut être exposée à un effort dans le sens du courant, cette disposition ne suffit plus, il faut relier les pieux par une moise inclinée partant du niveau des basses eaux en aval et s'élevant jusqu'au chapeau en amont, Pl. XXXII fig. 1 2 et 3. Si la vitesse du courant est considérable et s'il y a à craindre le choc des corps flottants, une simple moise inclinée ne suffit plus, il faut alors relier les pieux d'abord par des moises horizontales placées au niveau des plus basses eaux, et en outre par des moises inclinées disposées comme dans l'exemple précédent. Quelquefois même on croise ce cours de moises inclinées de l'amont à l'aval par d'autres inclinées de l'aval à l'amont. Pl. XXXIII, fig. 1, 2, 3 et 4.

Quand le cours d'eau est sujet aux débacles, on bat en amont de la palée et dans son prolongement un ou plusieurs pieux, suivant la hauteur de la palée, et on les relie à celle-ci, d'abord par des moises horizontales, ensuite par un chapeau qui, partant d'un niveau inférieur aux plus basses eaux vient butter contre les pieux d'amont de la palée, au dessus du niveau des plus hautes eaux. Pl. XXXIII, fig. 1. 2, 3 et 4.

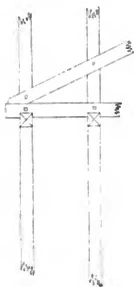
Enfin, quand à ces circonstances, se joignent une grande profondeur d'eau et des crues fort élevées au dessus

de l'étiage, on ne peut plus construire les palées avec des pieux d'un seul morceau, on n'aurait pas des bois assez longs. On les fait alors en deux étages, la basse palée est à proprement parler, la fondation de la haute palée et se dispose, autant que possible, de manière à être constamment au dessous des plus basses eaux, afin que l'on n'ait à renouveler que la haute palée lorsque les bois sont pourris dans les parties alternativement mouillées et séchées. Pl. XXXIII. fig. 1 et 2.

Les basses palées peuvent être construites avec un seul rang de pieux, ou avec deux. Dans un courant à la fois très-rapide et très-profond, on adopterait les deux rangs de pieux; dans les cas les plus ordinaires on n'en emploie qu'un seul rang. Dans ce dernier cas, les pieux sont reliés par un cours de moises doubles qui les embrassent et sont placées de manière que leur face supérieure ne s'élève pas au dessus de l'étiage. A l'aplomb des pieux, on place les poteaux des hautes palées dont on relie le pied par un second cours de moises doubles appuyées sur les premières et reliées à celles-ci par des boulons placés verticalement. Par cette disposition les quatre pièces formant ces deux cours de moises superposées sont reliées entr'elles et fixent solidement le pied des montants. Quant à ceux-ci, ils sont couronnés par un chapeau et en outre solidement reliés par des moises doubles disposées en croix de St André ou par plusieurs rangs de moises horizontales. Pl. XXXIII fig. 2.

Dans les basses palées formées de deux rangs de pieux, ceux-ci sont disposés de manière que deux d'entre eux se trouvent placés dans le sens vertical passant par chacun des montants de la haute palée. Chaque rang longitudinal de ces pieux porte un chapeau très-fort as-





-semblé à tenon, et destiné à recevoir les blochets sur lesquels la palée repose. (figure ci contre)

Quelquefois on réunit les pieux de chacun des rangs par des moises doubles, avant de placer le chapeau; il en résulte un emploi de bois très-considérable qui ajoute peu de chose à la stabilité.

Les montants de la haute palée, ainsi soutenus sur les chapeaux sont reliés d'abord par un cours de moises doubles reposant sur les chapeaux et ensuite par des doubles moises inclinées disposées en croix de St André. C'est dans ce système qu'a été construit le pont sur le Rhin à Strasbourg.

Lorsque les palées doubles reposent sur deux rangs de pieux, il faut que les brise glaces soient assez larges pour les protéger; on les forme de deux rangs de pieux disposés en triangle

§.2. Culées.

Dans les pays où le bois est abondant, et la maçonnerie chère, on construit quelquefois en charpente les culées des ponts en bois, surtout quand les fondations d'une culée en maçonnerie seraient difficiles et coûteuses.

Le revêtement d'une culée en charpente se compose de montants qui sont généralement des pieux assez longs pour avoir la fiche nécessaire à la stabilité et pour s'élever à la hauteur du tablier du pont. Si on n'a pas des bois

d'une longueur suffisante pour satisfaire à cette double condition, on fait une culée basse et une culée haute disposées à peu près comme les palées à deux étages, mais c'est un cas très-rare et nous supposerons que les montants sont formés par les pieux eux-mêmes.

Dans ce cas les montants des culées sont solidement fixés par le pied et il ne reste qu'à disposer la partie supérieure de manière que les terres ne puissent pas les renverser. On profite pour cela des poutres du pont et des ailes en retour. Ainsi les pieux de la culée sont coiffés d'un chapeau sur lequel reposent les poutres Pl. XXXII fig 1 et Pl. XXXIII fig. 7. 8 et 9, et ce chapeau de culée est lui-même maintenu par le chapeau de l'aile qui vient s'assembler à queue d'aronde sur le premier. Quant aux ailes qui sont ordinairement évasées, elles sont formées, comme les culées, de pieux espacés de mètre en mètre, et de madriers appuyés contre les pieux; on les maintient du haut soit par des tirants ou pièces de bois un peu inclinées qui vont se boulonner sur des pieux battus dans la masse des terres au delà du prisme de poussée, et qui sont également boulonnés sur les montants, soit par des tirants horizontaux qui traversant la culée entière, vont d'un pieu d'une aile au pieu correspondant de l'autre aile.

Les pieux d'angle sont ordinairement entaillés comme l'indique la figure 3 de la Pl XXXII, et la figure 8 de la Pl XXXIII, afin que les madriers qui forment le revêtement intérieur des ailes et de la culée puissent trouver de l'appui à l'angle où ils se rencontrent. Ces madriers se posent horizontalement afin qu'ils puissent s'appuyer sur les pieux, dès lors on ne peut pas les placer au dessous du niveau de l'eau. Pour empêcher les remblais de s'échapper par dessous, Pl. XXXIII figure 9, on réunit les pieux des ailes et ceux de la culée

par des liernes boulonnées intérieurement de manière à ce qu'elles soient immergées même dans les plus basses eaux. Ces liernes soutiennent les têtes de palplanches jointives que l'on enfonce dans tout le pourtour de la culée et des ailes et qui soutiennent une partie de la charge des remblais. Ces remblais doivent se faire derrière les madriers en pierres ou cailloux gros d'abord près du revêtement, puis de grosseur décroissante. Si on y plaçait de la terre, elle accélèrerait la pourriture du bois, et il arriverait souvent que cette terre détrempée par l'eau serait entraînée par les joints et qu'il y aurait des affouillements dans la culée.

Les dispositions que nous venons de décrire s'appliquent à des culées de médiocre hauteur, 3 à 4 mètres au plus, si elles avaient plus de hauteur et si le sol avait peu de consistance il faudrait mettre plusieurs étages de tirants de retenue.

Lorsque les fondations sont faciles, on fait quelquefois reposer les travées en charpente sur des piles et culées en maçonnerie et plus souvent sur des palées en charpente et des culées en maçonnerie.

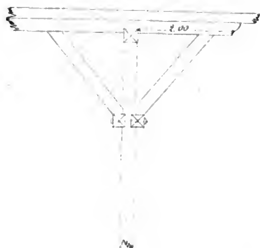
Art. 2. Travées.

§. 1. Lorsque l'intervalle entre les points d'appui ne dépasse pas 5.m, on forme les travées des poutres posées horizontalement sur ces appuis. On en calcule la force par les formules connues sur la résistance des matériaux et l'on arrive ainsi à un équarrissage d'à peu près 0.m 27 sur 0.m 32.

Si l'intervalle entre les points d'appui augmente et s'étend de 5 à 7.m, on soutient les poutres, soit par des consoles Pl. XXXII fig. 1 et 4, soit par des contre-fiches, Pl. XXXIII, fig 1. Pour employer les consoles près des culées, il faut avoir la possibilité de maintenir la partie engagée des consoles afin

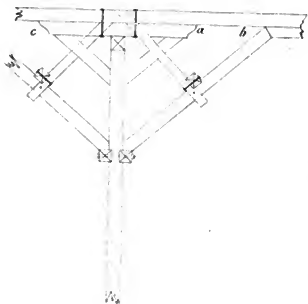
qu'elles résistent comme pièces encastrées. Sans cette précaution, elles chargent le plancher, elles occasionnent une dépense et ne servent à rien. Dans ce système on ne doit pas laisser plus de 4 à 5 mètres entre les sommets des contrefiches, ou entre les extrémités des consoles. Pour les travées plus grandes, on place sur les palées des sous poutres que l'on fait saillir sur les palées jusqu'à 2ᵐ et qu'on soutient par des contrefiches.

Fig. 4



Pour de plus grandes portées on emploie la sous poutre avec contrefiche au-dessous des palées et une seconde contrefiche battant à sa partie supérieure contre une autre sous poutre placée au milieu de la travée. Pl. XXXIII. fig 3 et 4.

Fig 5.



Avec ce système on peut aller jusqu'à 10 et 12ᵐ de largeur; mais il faut que la poutre et la sous poutre du milieu soient rendues solidaires l'une de l'autre, afin que la résistance soit proportionnelle au carré de l'épaisseur des deux pièces réunies. Dans cette travée poussée à sa limite, les grandes contrefiches ont plus de 12 fois leur équarissage, et elles fléchiraient si elles n'étaient pas maintenues. On les consolide au moyen de moises pendantes inclinées (fig. 3) et d'une moise horizontale.

Pour calculer la résistance dans une telle charpente, on doit supposer que la poutre simple ne résiste que par l'effet

de ses appuis, ainsi on verra d'abord si elle a une force suffi-
-sante entre a et b, puis entre b et son homologue b'. De a à c
elle aura une force surabondante, mais cela est nécessaire
pour que l'about ne se dérange pas.

Au delà d'une portée de 12 à 13m on a peu construit de ponts avec poutres et arbalétriers, cependant on en a établi quelques uns qui méritent d'être cités. Entr'autres un pont de 50m.70 sur le Kandel, dans le Canton de Berne Pl XXXIII fig. 6. Chaque ferme est composée d'une poutre soutenue par quatre cours d'arbalétriers échelonnés les uns au dessus des autres et reliés entre eux par des moises pendantes verticales.

Ces fermes supportent un toit léger dont la sablière fait système avec la poutre à laquelle elle est reliée non seulement par des moises pendantes, mais aussi par une pièce en décharge dont le pied s'appuie sur la culée.

On a également construit en Suisse plusieurs ponts composés de deux poutres armées soutenant à la fois le plancher et le toit nécessaire pour abriter les bois.

Nous disons nécessaire, parceque dans des édifices où toute la solidité tient à la parfaite liaison entre les pièces de bois, il faut qu'il n'y ait jamais d'humidité.

Parmi les ouvrages de ce genre, le plus surprenant est le pont sur le Limmat près de Vittingen, dont l'ouverture est de 118 mètres. Il est composé de deux poutres horizontales écartées de 3m20 environ l'une de l'autre et soutenues par trois systèmes d'arbalétriers, (fig. 5. Pl XXXIII)

La poutre inférieure est composée de deux pièces de bois superposées et taillées à redans pour rendre l'une solidaire de l'autre, elles sont fortement reliées entr'elles par des boulons et par des étriers qui en même temps supportent les pièces transversales du plancher.

La poutre supérieure est composée de quatre pièces

entaillées et réunies avec des boulons comme la poutre inférieure.

Le premier système d'arbalétriers a son pied appuyé sur la culée à 2^m50 au dessous de la poutre, et s'avance jusqu'à 32^m de cette culée.

Il y entre cinq pièces qui, s'appuyant les unes sur les autres près de la culée, ont leurs sommets également espacés sous la poutre. La pièce la plus longue a dû être faite de deux morceaux assemblés à redans.

Le second système prend ses points d'appui sur la poutre inférieure dans des redans taillés à cet effet sur une longueur de 20^m à partir de la culée, le plus long de ces arbalétriers est formé de deux pièces et n'aboutit sous la poutre supérieure qu'à 12 mètres du milieu. Les autres arbalétriers sont répartis uniformément, tant à leur sommet qu'à leur pied; celui du milieu est encore formé de deux pièces parce qu'il aboutit au point où repose sur la poutre supérieure, l'arbalétrier supérieur du troisième système placé au dessous de cette dernière poutre.

Ce troisième système forme une espèce de comble au-dessus de la poutre supérieure. Il n'y entre que trois pièces dont l'une armée qui est la plus élevée, butte à son sommet contre celle qui est placée symétriquement en sens opposé, la seconde parallèle à la première, vient butter contre un faux entrait placé à mi-distance entre les poutres et le point de rencontre des arbalétriers supérieurs, la troisième aboutit au tiers de ce faux entrait et butte contre un sous entrait.

Les arbalétriers du troisième système sont reliés entr'eux et à la poutre supérieure, à peu près sur la moitié de leur longueur, à partir du sommet par des boulons.

Les arbalétriers du premier et du second système sont reliés entr'eux et à la partie inférieure par des boulons.

Enfin les poutres et les arbalétriers sont reliés par des moises pendantes verticales distantes de 5.^{m}20 environ.

Lorsqu'on a construire des passerelles en charpente à grande portée pour le passage des gens de pied, on soutient quelquefois le tablier au moyen de garde corps disposés de différentes manières plus ou moins ingénieuses, par exemple comme dans la figure 10 Pl. XXXIII ou avec deux arbalétriers courbes buttant l'un contre l'autre et reliés du pied par un tirant en fer, soulagé en son milieu par un poinçon fig. 11. Les abouts des arbalétriers et leur joint de réunion sont fortifiés par des sabots en fonte.

Dans ces derniers temps, les Américains, pour faire passer leurs chemins de fer sur des cours d'eau considérables ou sur des vallons, ont imaginé des ponts en charpente auxquels ils ont donné le nom de Ponts à treillages, parceque en effet, ils en présentent l'apparence. Dans ces ponts, le chemin de fer est supporté par deux poutres armées composées de madriers qui se coupent en losanges et sont reliés par trois cours de moises dont deux sont placées au bas du treillis et un à la partie supérieure.

Le mieux combiné de ces ponts a été exécuté à Richmond, sous la direction de M. Robinson, jeune Ingénieur Américain élevé à Paris. La charpente de ce pont Pl. XXXIV, fig. 1, dont les travées ont 45.^{m} d'ouverture, se compose de chaque côté de deux fermes de treillis accolées, sur le sommet desquelles s'appuient les poutres portant le plancher qui reçoit le chemin de fer.

Les fermes ont 5.^{m}125 de hauteur et sont formées de madriers de 0.^{m}075 sur 0.^{m}275 se croisant en losanges et reliés par trois cours de moises dont deux sont placés à la partie inférieure, et un à la partie supérieure.

La Diagonale verticale des losanges à 1.^{m}47, la diagonale

horizontale 1m.22. Les madriers appliqués l'un sur l'autre sans entaille, sont reliés par des chevilles en chêne de première qualité, parfaitement calibrées et pour cela fabriquées à l'aide d'un emporte-pièce dans lequel on les fait passer. Quand les chevilles ont été enfoncées dans les trous percés avec précision, on les consolide en enfonçant des coins dans les deux abouts.

Les moises sont placées, le cours inférieur à la première croisée des madriers en treillis, le second, à la seconde rencontre, et le troisième à la dernière.

Chaque cours de moises est formé de deux madriers de 0m,075 d'épaisseur, 0m,30 à 0m,32 de largeur et de la plus grande longueur possible (10 à 12m); les joints sont croisés. Les deux fermes de treillis de chaque tête du pont sont séparées par des cours de moises, de sorte que la charpente réunie de ces deux fermes a une épaisseur de 0m,75.

Les moises de chaque cours sont reliées entr'elles et au treillis au moyen de chevilles en bois de chêne de 0m84 de longueur et de 0m.044 de diamètre comme celles du treillis ou par des boulons.

On n'emploie du fer que pour consolider les joints des moises des cours inférieurs, au moyen de plates bandes fixées à vis.

Les doubles fermes des deux têtes laissant entr'elles un intervalle de 3m,20 sont réunies (fig. 2).

1° A la partie inférieure par des traverses de 5m34 de longueur, 0m,35 d'épaisseur et 0m,25 de largeur, espacées de 4m.80 les unes des autres, et placées entre les deux rangs de moises inférieures.

2° A leur partie supérieure par d'autres traverses en nombre double des premières, de même équarrissage, mais de 6m,85 de longueur. Ces traverses sont entaillées légèrement sur leur face inférieure pour recevoir les doubles fermes de tête

et en maintenir l'écartement.

Sur les traverses supérieures sont placées des espèces de solives de 0m.010 à 0m.125 d'épaisseur plus hautes au milieu du pont que sur les côtés, et destinées à recevoir le plancher qui se trouve ainsi avoir une pente transversale favorable à l'écoulement des eaux (fig. 2).

Pour prévenir la déformation que ne manquerait pas d'éprouver une charpente aussi flexible, les doubles fermes sont contreventées.

1°. Dans le sens horizontal, par des Croix de St André placées dans l'intervalle des traverses inférieures (fig. 3 et 4)

2°. Dans le sens vertical, par d'autres croix de St André placées dans le plan vertical passant par les traverses inférieures (fig. 2)

Ce pont repose sur une suite de piles auxquelles on a donné seulement l'épaisseur nécessaire pour supporter le poids du pont et les charges accidentelles auxquelles il est soumis.

Pour prévenir la pourriture des bois résineux avec lesquels la charpente est exécutée, on cloue extérieurement, sur les faces verticales des fermes, des planches qui empêchent la pluie de frapper directement sur les bois; ils sont du reste, couverts en dessus par le plancher qui s'étend au delà du plan extérieur des fermes.

Les Ingénieurs Américains ne se sont pas bornés au seul système des ponts en treillage inventé par Mr Town, Mr Long en a imaginé un autre fondé sur un principe analogue; il remplace le treillis par des pièces disposées en Croix de St André (Voir les figures, 6, 7. 8, 9, 10, 11) Planche XXXIV

A chaque ferme de tête, les montants sont doubles, ainsi que les bras des croix de St André d, qui butent vers la culée de part et d'autre du pont. Les bras c de ces mêmes croix de St André sont simples. Les moises sont triples

comme dans le pont de Richmond, et l'une d'elles passe entre les montants. Les montants sont reliés aux moises par deux boulons, mais les croix de St André sont simplement ajustées comme l'indiquent les figures 5 et 6 et ne sont consolidées que par les coins g et g' avec lesquels on bande ces pièces.

Les deux fermes doubles dont une travée est composée sont reliées d'abord par des pièces de pont x qui reposent sur les moises inférieures et supportent le plancher, ensuite par d'autres traverses ou liernes placées au dessus des moises supérieures. enfin par des contrevents disposés comme les indiquent les figures 8 et 9.

En Bavière on a exécuté un viaduc de 49m avec culées évidées en maçonnerie et quatre fermes de charpente représenté Pl. XXXIV, figures 12 et 13

Ce qui distingue ce système du système Américain, c'est l'emploi des sabots en fonte pour recevoir les abouts de toutes les pièces comprimées dans le sens de leur longueur. C'est encore la disposition de la culée évidée dans laquelle les fermes sont maintenues sans être encastrées dans la maçonnerie.

On peut se rendre compte de la force des fermes Américaines, ou autres de même forme, en employant la formule suivante:

$$\frac{Pl}{8} = \frac{Ra(b^3-b'^3)}{6b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad [A]$$

dans laquelle P est le poids total dont le pont est chargé uniformément, l la longueur entre les appuis, a l'épaisseur totale des moises des deux fermes dans le sens horizontal, b la hauteur des fermes comprise entre les faces extérieures des moises supérieure et inférieure, b' la hauteur des vides entre les moises.

Prenons pour exemple le pont de M. Long, nous avons supposé le tablier chargé de 200 K. par mètre carré

comme on est dans l'usage de le faire en France pour les ponts en bois ou en métal, nous avons trouvé que la surcharge serait de $35 \times 5.50 \times 200 = 38500$ K. laquelle, augmentée du poids propre au pont d'environ 33000, donne un poids total de 72000K

$P = 72000$ $l = 33$, $a = 6 \times 0,25 = 1^m50$, $b = 4.50$, $b' = 4,00$
substituant et prenant la valeur de R, il vient:

$$R = \frac{Pl \times b \times 6}{8a(b^2 - b'^2)} = \frac{72000 \times 33 \times 6 \times 4.50}{8 \times 1.50 \times (4.50^2 - 4.00^2)} = 186300^K$$

ce qui fait par centimètre carré $19^K.16$. La résistance est de 600^K; ainsi, en supposant que les moises soient reliées entr'elles de manière à pouvoir être considérées comme d'une seule pièce, le bois ne travaillerait qu'au trentième de sa force absolue. Mais si au contraire on admet que les joints peuvent lâcher, on ne doit guère compter que sur une force des $\frac{2}{3}$ et on voit que le bois ne travaille encore qu'au 15e. Mais s'il sert pour un chemin de fer, cela est nécessaire parceque la charge est d'environ 1000 K. par mètre carré, sans compter le poids du pont.

On voit que ces fermes peuvent porter un grand poids mais elles se déforment, à ce qu'il parait très-facilement. Un autre inconvénient est d'exiger une grande hauteur, par conséquent de masquer la vue dans les villes, et surtout de ne s'appliquer qu'à des passages étroits, puisque pour contreventer convenablement le système on ne peut lui donner la largeur ordinaire des ponts.

Pour les ponts en charpente d'une grande portée on a imaginé il y a 50 ans environ, à Chassey (Département de l'Ain) et exécuté depuis dans toutes les contrées de l'Europe, des arcs composés de deux, trois ou quatre pièces courbes concentriques fortement reliées ensemble et formant ainsi des espèces de voûtes en bois. C'est en Bavière surtout que ce système

a été employé et poussé à ses dernières limites par M. Wiebeking, Directeur général des ponts et chaussées de ce Royaume. Il a construit ainsi des travées de 30 à 62^{m} d'ouverture en arc de cercle dont la flèche a varié du dixième au dix huitième, mais ces arcs composés d'un plus grand nombre de pièces courbes vers les naissances que dans le voisinage de la clef, et ayant surtout une flèche beaucoup trop faible, n'ont eu qu'une très-courte durée.

En France, on en a construit un grand nombre, ils ont, en général, parfaitement résisté, mais on a eu soin de conserver sur toute l'étendue des arcs le même nombre de pièces courbes et on n'a pas diminué les flèches au dessous de 1/8.

Parmi ceux qui ont été exécutés avec le plus de soin, je prendrai pour exemple celui d'Ivry-sur-Seine, construit par M. Emmery. Il a 22^{m}50 d'ouverture et 3^{m}48 de flèche ($\frac{1}{6.50}$ de l'ouverture) les arcs reposant sur des piles et culées en maçonnerie, établies comme pour un pont de pierre (Pl. XXXV) sont composés de trois rangs d'arbalétriers courbes dont les morceaux ont à peu près 4^{m}20 de longueur et 0^{m}25 d'équarrissage.

Sur la longueur de chaque morceau il y a quatres ligatures, deux par des moises pendantes, deux par des étriers également espacés les uns des autres sur tout le périmètre de chaque arc. Ces arcs s'appuient sur des piles et culées en maçonnerie et supportent le poids du plancher qui leur est transmis au moyen de moises pendantes dont nous avons parlé.

Le plancher lui même repose directement sur des longerons qui, placés suivant la pente du pont, ont leur face supérieure tangente à l'extrados de l'arc et sont par conséquent coupés en sifflet à l'extrémité qui s'appuie sur l'arc (Pl. XXXVI)

Pour diminuer la portée des longerons, on a placé au dessous des corbeaux ou sous poutres engagés d'un bout dans la maçonnerie sur laquelle ils font une saillie de 3^{m}50.

Ces sous poutres sont elles-mêmes soutenues par deux contre-fiches échelonnées l'une au dessus de l'autre.

Afin de rendre solidaires les différentes fermes et d'empêcher leur déformation dans le sens horizontal, elles sont reliées les unes aux autres, d'abord par des cours de moises doubles placées, les unes au dessus des arcs, les autres au dessous et embrassant dans chaque cours les moises pendantes dont nous avons parlé précédemment, ensuite par des contrevents ou pièces placées en diagonale d'une ferme à l'autre. (Pl.XXXVI. fig.2)

Afin que les moises horizontales servent en même temps à serrer les arbalétriers courbes, les moises pendantes sont taillées en biseau à la rencontre des premières (comme l'indiquent les figures 3.4.5 et 7 de la Pl.XXXVI)

Les contrevents en bois prennent leurs points d'appui sur les moises horizontales et sont placés à la hauteur des rangs inférieurs des arbalétriers courbes, comme on le voit fig 1 et 2 Pl.XXXVI et Pl.XXXVII). Des contrevents en fer, dont les détails sont indiqués fig.2.8.9.10 et 11. servent à consolider le plancher, aussi bien que les ancres représentées fig 3.4 et 5 de cette dernière planche.

Les étriers au moyen desquels on serre les trois arbalétriers courbes entr'eux sont représentés au bas de la Pl.XXXV. Au moyen des écrous dont les branches latérales de ces étriers sont munies, on peut à toute époque de la durée du pont resserrer les arbalétriers courbes les uns contre les autres; cela est indispensable pour parer à la dessication des bois.

Les moises avec coupe en biseau sont très-utiles pour permettre cette opération.

Les longerons des deux travées contigues à leur jonction au dessus des piles, sont reliés l'un à l'autre, dans chaque cours, au moyen de plates bandes placées sur leurs

pièces latérales ; ils sont de plus fixés au milieu des piles, et aux culées, au moyen de tirants verticaux descendant dans la maçonnerie et fixés à des clefs horizontales. Par ce moyen et par la réunion des longerons aux arcs, toutes les travées sont solidaires et les piles mêmes sont entretoisées entr'elles ; les tirants ont de plus l'avantage de faire résister les longerons comme pièces encastrées.

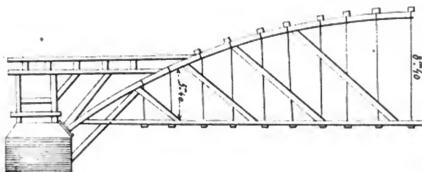
Lors de la construction du pont de Choisy au lieu d'élever les piles jusqu'au plancher, on les avait arrêtées à la hauteur des naissances. Il est résulté de là que les vibrations se transmettaient d'un arc à tous les autres, aussi bien que les poussées horizontales produites par la butée des arcs et par les moises pendantes inclinées. de sorte que les assemblages se sont très-promptement altérés. Aussi après quelques années de service on a dû, dans l'intérêt de la sûreté publique interdire le passage des voitures sur ce pont, et quand on l'a rétabli, Mr. Coriolis, chargé de ce soin a élevé les piles jusqu'au plancher.

A partir de cette époque, les piles des ponts en charpente ont toujours été construites de manière à isoler les charpentes des travées contiguës, excepté à la hauteur des longerons, et encore ceux-ci sont reliés aux piles par des ancres en fer. Pl. XXXVII. fig. 3 et 5.

Le système de ponts en arcs courbes a été exploité par les Ingénieurs Américains, en concurrence avec les ponts à poutres armées. On a construit à Trenton, sur la Delaware, un pont de 5 travées de 60m. formées d'arcs auxquels le plancher est suspendu.

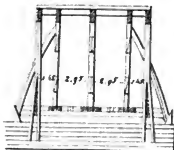
Dans chaque travée il y a cinq arcs qui s'élèvent de toute leur hauteur au dessus du plancher, ils sont inégalement

écartés ; les deux passages du milieu ont une largeur de 2m.95 pour recevoir les voitures tandis que les deux extrêmes n'ont que 1m.45 et servent au passage des piétons.



Pont de Trenton sur la Delaware

Les arcs formés de 8 planches de pin de 9 à 15 de longueur, superposées, ont 0m.80 d'épaisseur et 0m.325 de largeur. Leur flèche est de 8m.40, ils portent du pied sur les piles et se contrebutent d'une travée à l'autre, au moyen d'une charpente qui passe au dessus de la pile intermédiaire et s'élève à peu près aux deux tiers de la hauteur des arcs à 5m.80



Coupe du Pont de Trenton

Les cinq arcs d'une même travée sont reliés par des entretoises correspondant aux tiges de suspension, depuis le sommet jusqu'à la hauteur de la charpente dont nous venons de parler. Ces entretoises ne pourraient descendre plus bas sans gêner le passage des voitures. Les tiges de suspension des trois arcs intérieurs sont écartées de 2m.60; elles sont en fer forgé; celles des arcs extérieurs sont espacées de 4m.80

Le plancher est en outre relié aux arcs par huit liens pendants inclinés à peu près à 45°. Ces liens sont fixés aux arcs et au plancher par des étriers.

Des espèces de jambes de force sont placées extérieurement sur les piles pour maintenir les arcs dans leur position verticale.

Dans le même but, les fermes de tête sont maintenues près des piles entre deux moises disposées comme des arbalétriers

et engagées dans la maçonnerie des piles.

Toute la charpente du pont est recouverte par un toit et abritée latéralement par des planches.

Il existe à Leeds, dans le Comté d'York, un pont construit dans un système analogue; seulement les arcs descendent au dessous du tablier, de manière que le plancher est porté par les parties inférieures, tandis qu'il est suspendu au milieu de l'arc. Ce dernier système, dans lequel le plancher forme entrait à la moitié de la hauteur de l'arc, nous parait plus solide.

Art. 3. Planchers, Garde-fous, &c.

Le passage ne peut être établi sur un pont en bois qu'autant qu'on a réuni les différentes fermes dont il est composé, au moyen d'un plancher assez fort pour supporter les plus lourdes voitures qui fréquentent la route sur laquelle ce pont est placé.

On peut faire reposer le plancher soit directement sur les poutres ou les longerons des travées, soit sur des pièces transversales qui se placent perpendiculairement à la direction des fermes et auxquelles on donne le nom de pièces de pont.

On n'établit le plancher directement sur les poutres que dans les ponts de la forme la plus simple, quand il en coûte moins à employer une poutre de plus, qu'à accroître l'épaisseur du plancher.

Lorsque les fermes sont composées de plusieurs pièces, il y a avantage à employer les pièces de pont, non seulement parce qu'il y a économie de bois, mais aussi parceque les poutres qui reçoivent directement le clouage du plancher sont promptement pourries, sous ce plancher qui entretient une humidité constante. Il y a cependant des circonstances où l'on néglige cette considération

et même celle de l'économie : c'est dans les villes, quand l'élévation du pont entraînerait le rehaussement des abords et donnerait lieu, par suite, à des indemnités envers les propriétaires des maisons qui se trouveraient être enterrées.

Quand le plancher repose directement sur les poutres, comme dans le pont construit dans le département du Bas Rhin et représenté Pl. XXXII. fig. 1, on intercale dans les madriers les pièces de pont pour supporter et consolider les poteaux des garde-corps, ainsi qu'on le voit dans la coupe qui donne le détail des garde-corps du pont que nous venons de citer (Voir la Planche). Les madriers sont alors perpendiculaires aux fermes.

Si les madriers sont au contraire supportés par les pièces de pont, celles ci se placent normalement aux poutres ou longerons et les madriers sont dirigés dans le sens de la longueur du pont.

Dans le premier cas, le plancher est toujours plan parce que les fermes sont d'égale hauteur et que l'on ne pourrait ni dé-maigrir les pièces de pont, ni faire plier les madriers ; dans le second cas au contraire on donne ordinairement au plancher une double pente transversale pour faciliter l'écoulement de l'eau. On obtient cette pente en débitant les pièces de pont avec un renfle-ment au milieu, ou en les renforçant au milieu avec des fourru-res inclinées.

Les pièces de pont sont ordinairement entaillées de 0m.05 à la rencontre des poutres ou longerons ; cette entaille rend les dif-férentes fermes solidaires les unes des autres.

L'écartement des pièces de pont doit principalement se dé-terminer d'après la considération de l'épaisseur des madriers for-mant le platelage du pont, laquelle varie de 0m.08 à 0m.10. La charge devrait se calculer en supposant que l'un des madriers sup-porte seul le poids de la roue d'une charrette très-lourde, par exemple 4000 k ; mais si on donnait aux madriers l'épaisseur suffisante pour résister à une telle charge permanente, on serait

conduit à leur donner des dimensions énormes en épaisseur ou à écarter très-peu les pièces de pont. Comme la charge n'est qu'accidentelle, on peut admettre que le bois au lieu de travailler au dixième de sa force absolue, travaille au cinquième ou au sixième et on arrive ainsi à l'écartement admis de 0m.50 pour des madriers de 0m.08 d'épaisseur. Il est à remarquer d'ailleurs que le roulage ne passe pas directement sur le plancher dont nous venons de parler, mais sur un pavage ou un second plancher dirigé dans un sens normal au premier, quand les madriers inférieurs sont placés en long.

Les garde-corps s'assemblent sur les pièces de pont isolées comme sur les pièces de pont noyées dans le plancher. Lorsqu'ils sont en bois, l'assemblage se fait ainsi que l'indiquent les fig. 5 et 7 de la planche XXXII

Le lien pendant ou jambe de force extérieure passe par dessus la pièce de pont et reçoit le tenon de celle-ci. Quelquefois le lien pendant est boulonné sur le poteau montant et sur la pièce de pont. Ce système est solide, mais moins satisfaisant à l'œil, puisqu'il n'y a pas symétrie. Pour obtenir cette régularité, on a, dans quelques cas, employé deux moises embrassant le poteau.

Autrefois, dans l'espérance de donner plus de force aux assemblages, on faisait porter la jambe de force sur la pièce de pont qui, à cet effet, avait une mortaise sur sa face supérieure. L'eau séjournait dans cette mortaise et la pourrissait très promptement. On emploie exclusivement les garde-corps en bois dans les ponts dont les culées sont en charpente. Cela se fait encore dans les ponts de service.

Sur les ponts avec culées en pierre, on fait souvent usage de garde-corps en fer, mais pour cela il faut encore qu'il y ait des trottoirs, parceque les garde-corps en fer ne résisteraient pas suffisamment au choc d'une voiture. Les garde-corps sont-

composés de poteaux verticaux, de lisses horizontales et de jambes de force. La lisse supérieure est continue dans les garde-corps en fer comme dans ceux en bois, celle inférieure s'assemble sur les faces latérales des poteaux, mais les lisses inférieures en bois se placent de manière que les diagonales soient horizontales et verticales, tandis que les lisses en fer se placent avec leurs faces horizontales et verticales.

A raison du faible équarrissage des poteaux et des lisses en fer, il y aurait de très-grands vides dans les garde-corps, si on ne garnissait pas les intervalles rectangulaires entre les montants et les lisses par des barres de fer disposées en Croix de St André ou si on n'employait pas plusieurs rangs de lisses comme au pont d'Ivry (Pl. XXXV et XXXVI)

On termine ordinairement les garde-corps à la rencontre des parapets élevés sur les piles et sur les culées (Pl. XXXVI.) dans ce cas, pour que les effets de la dilatation ne fassent pas onduler les lisses ou pour que les maçonneries ne soient pas tirées par le retrait lors du refroidissement, on ne scelle pas les lisses dans la pierre, mais on les engage chacune dans un manchon en fonte scellé dans les parapets ; de sorte qu'elles s'enfoncent dans le manchon ou s'en retirent sans compromettre la solidité ni du garde-corps ni de la maçonnerie et en restant toujours parfaitement fixées.

Dans les garde corps en bois, les assemblages se font à tenon et mortaise sans disposition particulière, si ce n'est que les lisses inférieures ont ordinairement leurs abouts encastrés d'un ou deux centimètres dans les poteaux.

Dans les garde corps en fer, les assemblages se font comme l'indiquent les figures 16 et 17 Planche XXXVII. Au dessus de la lisse supérieure assemblée à tenon sur le montant, on place une main courante ou plate-bande en fer plat maintenue par un rivet traversant le tenon qui est le prolongement du poteau

les lisses intermédiaires et les croix de St André portent des mortaises indiquées par des points sur ces pièces et elles viennent se fixer par des rivets sur un double tenon rapporté qui traverse le poteau. Le poteau lui-même est fixé soit par son prolongement qui fait boulon et se trouve fixé sur la pièce de bois qu'il traverse au moyen d'un écrou inférieur et d'une embase qui lui permet de s'appuyer soit sur le plancher, soit sur une longrine placée sur la pièce de pont pour former le trottoir (Pl XXXVII). fig. 1)

Les trottoirs sont eux-mêmes disposés d'une manière analogue à celle qu'indique la coupe du pont d'Ivry (Pl XXXVII)

Pour empêcher toute espèce de vibration dans le sens horizontal, lorsque les pièces de pont sont d'égale épaisseur sur toute leur longueur, on place sur ces pièces avant la pose du plancher, des contrevents en fer analogues à ceux représentés fig. 2. Pl XXXVII). Ils sont très-solidement attachés à leurs extrémités, au moyen de forts boulons fixés soit aux longerons de tête, soit à la maçonnerie. fig. 2 et 8. Au point où ces pièces se croisent, l'une porte une mouffle dans laquelle passe l'autre. fig. 9.

Pour monter les fermes des ponts en charpente, lorsqu'elles ne sont pas seulement formées de poutres reposant sur les appuis on est obligé de construire des ponts en cintres provisoires analogues à celui qui est représenté Pl XXXV. Si l'on n'a pas de pièces assez longues pour aller d'une pile à l'autre, on forme une espèce de ferme retroussée sans entrait. C'est ce que l'on a fait au pont de Chatou, sur le chemin de fer de St Germain, et on a élevé les fermes toutes montées malgré une crue de la Seine de 2 ou 3m.

Au moyen de cette espèce de cintre on pose les arcs pièce à pièce en commençant par le bas. Les arbalétriers inférieurs sont encastrés dans une rainure creusée ad hoc dans la pierre afin que l'humidité qui s'introduirait dans cette rainure ne pourrisse pas le bois; on place au dessous des abouts un coussinet en fonte, disposé comme l'indiquent les fig. 12, 13 et 14 Pl XXXVII

et percé d'ouvertures par lesquelles l'eau peut avoir un libre écoulement. La rainure est plus large que le bois, afin que l'air circule librement autour des arbalétriers.

Au fur et à mesure de la pose des arbalétriers qu'on soutient sur les moises horizontales inférieures, on les relie les uns aux autres au moyen de moises pendantes. Quelquefois pour la plus facile approche des bois, l'échafaud, ou le cintre est élevé à une hauteur suffisante pour établir un plancher provisoire à la hauteur du plancher définitif, mais il en résulte un surcroît de dépense qui ne serait motivé que par l'urgence du travail. Quand les moises pendantes et les courbes sont en place, on pose les longerons, sous poutres, arbalétriers, puis les moises horizontales de l'extrados, et on fixe définitivement toutes ces pièces. Ce n'est qu'après cette pose définitive que l'on taille sur place et que l'on fixe les contrevents.

Pour réunir les arbalétriers avec les sous poutres, on peut employer différents assemblages : soit par embrèvement simple avec tenon fig. 6 et 7 Pl. XXXV et fig. 10 et 11 Pl. XXXVI ; soit avec tenon renforcé sans embrèvement ; soit encore avec un assemblage anglais. L'assemblage fig. 6 convient lorsqu'on a à résister à une très forte buttée et que l'on ne craint pas l'humidité dans l'assemblage. le second à la rencontre des arbalétriers avec les poutres et sous poutres, enfin le troisième ne doit s'employer que pour les assemblages inférieurs de pièces inclinées sur d'autres horizontales, parceque, évitant les mortaises, la pourriture est moins à craindre.

Une attention très-importante à avoir quand on monte un pont en arc de plusieurs travées, c'est de contrebuter les piles par des pièces horizontales appuyées sur les cordons à la hauteur des naissances, ou de cintrer toutes les arches les unes avec les autres afin que leurs poussées se détruisent, ou simplement échelonner le travail de manière que la première étant arrivée à moitié, la seconde soit au tiers &c.

Lorsque toute la charpente est montée, que les bois commencent à éprouver une dessiccation qui nuirait à leur solidité, on peint ou on goudronne toutes les faces apparentes, mais il faut se garder de peindre ou de goudronner des bois qui ne sont pas parfaitement secs.

Nous avons parlé plus haut de deux manières d'établir le passage soit sur un plancher en charpente, soit sur un pavage; ces deux systèmes ont été souvent discutés sans qu'une solution définitive en soit résultée.

Lorsqu'on construit deux planchers, le second est le seul en contact avec les roues et les pieds des chevaux; l'écrasement auquel il est soumis, détruit plus ou moins la cohésion des fibres, le bois s'imprègne de beaucoup d'eau, et en définitive, lorsque le passage est fréquent, il faut renouveler le plancher très-souvent. Ce renouvellement force à arracher les clous qui fixaient les madriers à en enfoncer de nouveaux, de sorte que le premier plancher lui-même finit par s'altérer.

Quand on établit sur le plancher un pavage ou un empierrement, ce plancher ne souffre ni plus ni moins, quelque soit le degré de la fréquentation, mais pour l'établissement de ce plancher on a augmenté beaucoup la charge du pont, et l'humidité que la forme entretient accélère la destruction du bois.

Quelques Ingénieurs ont, il est vrai, paré à cet inconvénient en recouvrant les madriers de feuilles de métal disposées avec une légère pente et chargées de gravier, de manière que l'eau puisse s'écouler par les issues qu'on lui a ménagées.

Nous pensons que sur les ponts peu fréquentés, les doubles planchers doivent être employés, mais que partout dans les villes où une interruption de passage occasionne une très grande gène, il faudrait adopter le plancher unique avec couverture en feuilles de métal et empierrement ou pavage par dessus.

Les feuilles de métal ont l'avantage d'abriter de l'humidité

non seulement le plancher, mais aussi toutes les pièces de la charpente, et parconséquent doivent augmenter considérablement la durée des ponts ainsi disposés.

On a démonté dernièrement sur la Seine, un pont sur lequel cette précaution avait été prise; les bois en étaient parfaitement conservés.

Pour augmenter la durée des ponts à double plancher, on a souvent essayé de garnir la voie des roues par des bandes de fer posées, soit en long, soit en travers; mais on y renonce généralement, parceque ces bandes coûtent fort cher, qu'elles finissent par se casser, et surtout parceque les chevaux ne peuvent pas s'y cramponner et y glissent.

4.e Section

Ponts en fonte et en fer.

Introduction

La fonte et le fer appliqués à la construction des ponts y ont été employés de deux manières essentiellement différentes. Dans les uns ces matières résistent comme pièces rigides; dans les autres elles sont soumises à une pression comme la pierre dans les ponts en maçonnerie.

Nous allons successivement passer en revue ces divers systèmes de ponts, en citant les principaux exemples de leur application.

§. 1.er

§. 1er.
Emploi de la fonte.

Art. 1er Poutres droites

Quoique l'emploi des poutres droites paraisse plus naturel que celui des arcs, les premiers ponts dans lesquels on a fait usage de la fonte ont été exécutés avec des arcs. Il est probable que cela a tenu à la crainte que l'on avait de soumettre des pièces droites en fonte à des efforts transversaux, tandis que l'on croyait pouvoir compter sur la résistance de cette matière travaillant à la compression. Ainsi, au pont des Arts à Paris, les longerons en bois sont portés par des arcs en fonte.

Ce n'est guère que depuis 1840 que l'on a employé les poutres droites en fonte et c'est à l'occasion de la construction des chemins de fer que cet usage s'est introduit.

On a d'abord donné à ces poutres la forme d'une lame de fonte d'une épaisseur uniforme, puis on a élargi les parties supérieures et inférieures aux dépens de la partie centrale; et enfin, en marchant dans cette voie on est arrivé à former ces poutres de deux nervures, l'une supérieure, l'autre inférieure, réunies soit par une âme pleine ou évidée mais fort amincie, soit par des croisillons, soit par de simples diagonales disposées de manière à travailler à la compression.

Lorsque la charge doit porter sur la nervure inférieure, l'âme doit être pleine.

La fabrication de ces poutres exige, de la part du fondeur, une précaution essentielle, nécessaire, au reste, toutes les fois que l'on exécute des pièces dont toutes les parties n'ont pas la même épaisseur.

Les plus minces, toutes choses égales d'ailleurs, se refroidissant plus vite que les parties plus épaisses, se contractent

bien avant ces dernières, si on laissait la pièce dans le sable, sans se préoccuper de cet effet de retrait, il pourrait se produire ou se préparer des fissures à la jonction des parties minces et des parties épaisses. On prévient cet effet, en se hâtant dès que la fonte est figée, d'enlever une partie du sable recouvrant les parties épaisses pour recharger les parties minces, l'âme ou les croisillons.

Avant que l'on eût imaginé de faire des poutres en tôle, on en exécutait en fonte sur des portées de 10 à 14m. Maintenant on n'en fait guère usage que pour des portées restreintes de 7 à 8m au maximum.

Art. 2. Arcs en fonte.

C'est en Angleterre que l'on a exécuté les premiers ponts avec les arcs en fonte. Celui de Coalbrookdale sur la Severn, construit de 1773 à 1779 paraît avoir été le premier ouvrage de ce genre. Il offre une seule arche de 30m.62 d'ouverture en plein cintre. Pl. XXXVIII. Il est composé d'un arc complet et de deux portions d'arcs concentriques qui, partant du même plan de naissance que le premier s'arrêtent à la rencontre du longeron légèrement incliné sur lequel le tablier du pont est établi. Le premier fondu en deux morceaux réunis au sommet, a une section rectangulaire de 0m.211, sur 0m.133; les deux autres ont une section carrée de 0m.146. Ces trois arcs sont réunis entre eux et au longeron par des montants normaux fixés au moyen de boulons sur des oreilles venues de fonte avec les arcs. Ils portent du pied sur une plaque de fondation scellée sur des retraites pratiquées à cet effet dans les culées.

Les fermes sont espacées de 1m.49.

En France, plusieurs projets ont été présentés pour construire des ponts en fer forgé, en 1779, en 1782, 1783 et 1790 mais

ils n'ont pas été exécutés.

En 1795, Telford a fait construire en fonte à Buildwas un second pont en fonte disposé ainsi que celui de Coalbrookdale, avec de longues pièces de fonte, agissant à peu près comme les pièces de charpente dans les ponts en bois, seulement le tablier coupait les arcs à mi-hauteur.

C'est de 1790 à 1796 qu'un autre Ingénieur Anglais, M. Payne, a imaginé le système des voussoirs et en a fait une importante application au pont de Wearmouth près de Sunderland de 71m.91 d'ouverture et 10m.36 de flèche. Les fermes au nombre de 6 sont éloignées de 1m.83 de milieu en milieu. Chaque voussoir est formé de trois arcs concentriques réunis par deux montants normaux. Ils sont reliés dans une même ferme, par trois arcs concentriques en fer forgé, encastrés dans des rainures venues de fonte dans le milieu de la largeur des arcs, et, d'une ferme à l'autre, par des entretoises à double T boulonnées sur les arcs en fer forgé.

Les tympans sont formés par des cercles en fonte tangents à l'arc d'extrados et aux longerons et reliés entr'eux.

De 1800 à 1806, on a construit à Paris deux ponts en fonte l'un pour les piétons, vis à vis le Louvre, dans le système de Coalbrookdale; l'autre pour les voitures, connu sous le nom du pont d'Austerlitz, dans le système du pont de Wearmouth. Pl XXXVIII, fig. 4 et 5. Dans ce dernier, les voussoirs formés de trois arcs concentriques étaient réunis par cinq montants normaux, dont les deux extrêmes terminaient les voussoirs et n'étaient en contact d'un voussoir à l'autre que par des portées correspondantes aux arcs.

Au pont de Wearmouth, les voussoirs se terminaient dans le milieu des portions d'arcs s'étendant au delà des montants.

Les tympans du pont d'Austerlitz étaient formés de chassis correspondants aux voussoirs, mais composés de montants en nombre moitié et d'arcs deux fois plus distants.

Les voussoirs d'un même arc n'étaient réunis que par de courtes plate-bandes en fer fixées sur chaque voussoir par un boulon.

Les arcs ou fermes étaient rendus solidaires au moyen d'entretoises à T comme au pont de Wearmouth.

Malheureusement, ce système n'a pas réussi, et en 1855 quand nous avons appelé l'attention de l'Administration sur l'état du pont d'Austerlitz, on y comptait quatre à cinq mille ruptures que l'on avait réparées tant bien que mal avec des armatures en fer forgé. On en a constaté environ six mille quand on a démonté les arcs en fonte pour les remplacer par des voûtes en maçonnerie.

Cet insuccès joint au prix élevé de la fonte a, pendant près d'un demi-siècle, arrêté le développement des ponts en fonte et c'est seulement après la construction du pont du Carrousel que ce mode de construction a repris faveur en France. On en a exécuté plusieurs dans le même système, consistant dans l'exécution d'arcs en fonte formés de deux demi-tuyaux courbes disposés à joints croisés et assemblés au moyen de boulons tant dans le sens longitudinal qu'aux abouts des voussoirs. Les tympans sont formés de cercles à rayons décroissants, comme au pont de Wearmouth.

Mais le pont du Carrousel et tous ceux exécutés dans le même système sont sujets à des vibrations qui, quoique inoffensives jusqu'à présent peuvent faire craindre à la longue une altération. Aussi a-t-on généralement préféré dans les derniers ponts en arcs exécutés en France, les voussoirs pleins avec nervures. Les premiers exécutés sur les chemins de fer sont ceux du Chemin de Montereau à Troyes et ceux de la ligne de Paris à Lyon. La Planche XXXIX donne les dispositions au pont de Bernières en trois arches de 22^{m} d'ouverture sur 2^{m}.46 de flèche.

Chaque arc est composé de cinq voussoirs de 0m.50 de hauteur dans le sens du rayon, et présentant en coupe la forme d'un double T dont les nervures de 45 millimètres d'épaisseur vont en s'élargissant, des naissances où elles ont 0m.25 jusqu'à la clef où elles ont 0m30 à l'intrados.

L'âme de 40 millimètres aux naissances va jusqu'à 50 à la clef, où la nervure supérieure est modifiée comme l'indiquent les figures.

Les tympans qui viennent s'araser horizontalement avec l'intrados des voussoirs de clef, sont formés de plaques en fonte fortement évidées et disposées de manière que les pleins des tympans correspondent aux joints des voussoirs auxquels elles sont réunies par des boulons traversant les brides doubles qui les terminent. Les joints compris entre ces brides sont remplis de mastic de limaille. Au dessus des tympans sont élevés des garde-grèves de 0m50 de hauteur faisant suite au voussoir central.

Les six fermes dont se compose une travée sont reliées 1° par des boulons horizontaux engagés dans des tuyaux, de manière à empêcher le rapprochement et l'écartement des fermes. 2° par des croix de St André en fonte fixées par des boulons sur les plaques des tympans. 3° par des plaques en forte tôle bombées en leur milieu et boulonnées sur les nervures qui terminent les tympans à leur partie supérieure.

Les voussoirs formant la clef des arcs sur les deux têtes et les garde grèves qui y font suite, forment l'encoffrement du ballast de la voie du chemin de fer.

Les essais faits sur ce pont avec des locomobiles attelées à la suite les unes des autres, n'ont fait reconnaître que des flexions de quelques millimètres au passage de ces trains. Mais depuis seize ans qu'il est exécuté, il s'est produit quelques ruptures dans les contrevents en fonte et l'on n'a pas balancé

à y renoncer pour les remplacer par d'autres en tôle et fer à cornières qui ont parfaitement résisté. Cette expérience, comme celle du pont d'Austerlitz, devrait engager à employer des contrevents en fer, même dans les ponts en fonte, parceque la fonte résiste mal aux vibrations auxquelles ces pièces sont soumises.

Enfin, dans ces dernières années on a exécuté à Tarascon sur le Rhône, à Nevers sur la Loire et à Paris, des ponts à grandes portées, dans un système analogue, mais avec quelques changements qu'il est nécessaire de signaler.

Les arcs du pont de Solferino que nous prendrons pour exemple ont 40 mètres d'ouverture et 4^{m}.02 de flèche. Pl XL, fig. 1.2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 et 15. Ils sont formés de voussoirs pleins en fonte, comme au pont de Bercy(?), excepté ceux des têtes, qui, chargés seulement du poids du trottoir et beaucoup moins fatigués que les autres sont évidés. Ils sont terminés par des brides suivant lesquelles ils s'appuient les uns sur les autres et qui servent en même temps à les relier au moyen de boulons Pl XL. fig. 1.2 et 3.

Les arcs sont écartés de 2^{m}50 les uns des autres.

Les tympans formés de plaques évidées de forme trapézoïdales portent sur tout leur pourtour des brides au moyen desquelles on les fixe soit entr'elles, soit aux arcs, soit aux pièces qui les surmontent

Les fermes sont reliées entre elles par des entretoises normales placées, les unes immédiatement au dessous de la nervure d'intrados, fig. 1 et 2; les autres sont au dessous de la nervure d'extrados et servent tout à la fois à entretoiser les fermes entre elles, et à relier les voussoirs deux à deux, parcequ'elles se terminent à chacune de leurs extrémités par deux queues d'hironde dont l'ajustement demande à être décrit d'une manière particulière.

Les arcs portent de part et d'autre des brides de joints des nervures et de 0m.15 de saillie fig. 4 formant des poches carrées plus larges au fond qu'à l'entrée, et offrant le même angle d'évasement que les queues d'hironde des entretoises.

Ces queues d'hironde ont en largeur des dimensions calculées pour qu'elles puissent pénétrer dans ces poches avec un très-faible jeu.

Quand elles sont ainsi engagées chacune dans la poche qui lui correspond, on répartit également le jeu entre les faces latérales de la queue d'hironde et celles de la poche dans laquelle elle est logée et on bourre de la limaille de fer, mouillée d'un sel ammoniacal, dans le vide existant sur l'un des côtés de la queue d'hironde, puis, dans le vide opposé on place deux coins en fer, l'un se met en avant, l'autre en sens inverse et on chasse ce dernier à coups de marteau. Lorsque l'on a serré fortement les coins qui n'ont que 5 à 6 centimètres de largeur, on achève de remplir le surplus des joints entre la queue d'hironde et la poche avec de la limaille de fer bien comprimée.

Quand cette limaille a durci, l'entretoise se trouve parfaitement adhérente à l'arc, aucun mouvement n'est possible dans cet assemblage et cependant quoique l'on n'ait eu à faire aucun travail d'ajustement, soit au burin, soit à la lime, on a obtenu une solidarité parfaite entre les arcs.

Indépendamment de la liaison établie entre les arcs au moyen des entretoises dont il vient d'être question, les fermes sont encore reliées par d'autres entretoises reposant sur les nervures qui couronnent les tympans à leur partie supérieure et correspondent aux joints des plaques de tympans; ces sortes de pièces de pont écartées de 1m,30 les unes des autres servent à soutenir des voûtes en briques et ciment romain sur lesquelles la chaussée et les trottoirs sont établis.

Les trottoirs sont surhaussés au dessus de la chaussée sur les fermes de tête par une corniche en fonte décorée de modillons et du côté de la chaussée par un mur en briques.

Le pont que l'on termine en ce moment entre l'île St Louis et la Cité (1862) est exécuté dans le même système, déjà inauguré à Tarascon pour le passage du chemin de fer de Cette à Marseille. Il a une ouverture d'environ 64 mètres.

Ce système de pont avec voussoirs en fonte paraît être le plus avantageux que l'on puisse employer, parceque toutes les pièces principales travaillent à la compression et que l'on n'a à craindre de rupture que dans les entretoises. Comme elles sont en petit nombre, on peut prévenir leur rupture en exagérant leurs dimensions ou en les exécutant en tôle.

Pour calculer les efforts auxquels seront soumises les différentes pièces qui entrent dans les ponts en fonte, on se sert, lorsqu'il s'agit de poutres droites de formules ordinaires déjà rappelées au sujet des poutres américaines. Mais quand les ponts sont formés d'arcs, le calcul est plus difficile. On peut d'abord pour avoir une idée approximative des dimensions à donner à ces arcs, supposer la charge uniformément répartie et calculer la compression en se servant de la formule des ponts suspendus que nous donnons plus loin. Puis, pour arriver à un calcul plus exact, employer les formules du cours de résistance applicables aux pièces courbes. Enfin si on ne connait pas ces formules et qu'on recule devant les calculs auxquels elles conduisent, quand on n'a pas les tables de M. Bresse, on peut appliquer aux arcs métalliques la méthode employée pour les ponts en pierre, en ayant soin, toutefois de remarquer qu'avec les ponts métalliques les charges accidentelles ne se réduisent pas à une faible fraction du poids du pont, mais sont, au contraire supérieures à ce poids, et que l'inégalité de charge a une très

grande importance.

Ainsi les pièces dont les arcs sont composés doivent être calculées pour le cas où une moitié de la travée étant complètement chargée, l'autre n'a au contraire aucune charge accidentelle.

On sera donc conduit à supposer pour une moitié de l'arc la surcharge la plus considérable que le pont puisse avoir à supporter (400^{k} par mètre quarré) tandis que l'autre moitié ne portera rien. Ces charges et les positions de leurs centres de gravité étant calculées, on déterminera par la méthode donnée précédemment pour les voûtes en pierre inégalement chargées, la direction et l'intensité de la poussée à la clef, et, par suite, le tracé de la courbe des pressions.

Si les hypothèses sur le passage de la courbe des pressions à la clef et aux naissances ne donnent pas des pressions égales ou à peu près égales dans les points les plus fatigués de l'arc, on modifiera la position de ces points jusqu'à ce que l'on arrive à satisfaire sensiblement à cette condition d'égalité de compression.

Dans le cas où le chiffre de compression maxima dépasserait la limite déterminée, on devrait augmenter ou la hauteur des voussoirs, ou la force des nervures.

Cette limite varie nécessairement avec le rapport des dimensions transversales des arcs et la longueur des portions de ces arcs comprises entre les contrevents disposés pour empêcher les flexions des arcs.

Les chiffres que cette limite ne doit pas dépasser ont été conclus des expériences de M.M. Hodgkinson et autres expérimentateurs. Ils sont à l'extension et à la compression pour le fer forgé ou laminé de . . . . 6^{kil}

Pour

Pour la fonte { à l'extension . . . . 2 à 3 Kil
à la compression lorsque la pièce
ne peut pas fléchir . . . . 5 à 8 K. }

Art. 2. Poutres en fer et en tôle.

1° Poutres droites

Quoique les premiers essais tentés pour former des poutres au moyen d'un assemblage de feuilles de tôle et de cornières remontent à peine à 14 ou 15 ans, on aurait peine à énumérer les ouvrages importants dans lesquels on a fait l'application de ce nouvel emploi du fer.

En consultant mes plus anciens souvenirs, je me rappelle une poutre droite en tôle et cornière présentée à l'exposition de 1849; mais, comme à cette époque, il n'avait encore été fait en France aucun travail utile dans ce genre de construction et qu'on n'y prévoyait pas l'étendue du parti que l'on en pouvait tirer, personne ne fit attention à cet essai et le procès-verbal des opérations du Jury n'en fait pas mention.

Jusqu'alors le haut prix de la tôle ne permettait pas d'espérer que l'on pût arriver à la substituer avec avantage au bois dans la construction des ponts, et les rares essais faits l'un vers 1840 au Canal du Nivernais par Mr. Poirée, l'autre en 1849 et 1850 par Mr. Mamiel, Ingénieur du Chemin de fer du Nord, pour l'établissement de ponts en fer, seraient peut-être restés longtemps sans imitateurs, si, en Juillet 1850, l'annonce de l'heureux succès obtenu par Robert

Stephenson, dans la construction du pont (Britania), sur le détroit de Ménay, n'était venu tout-à-coup, surprendre et éveiller les Ingénieurs en leur faisait connaître l'inauguration de ce colossal ouvrage, au moyen duquel le chemin de fer de Chester à Holy Head traverse un bras de mer à 33^m au dessus des hautes marées, au moyen de quatre travées dont deux de 140^m d'ouverture et deux autres de 70^m.

L'exécution de cet ouvrage avait d'ailleurs nécessité dans la fabrication du fer des perfectionnements nombreux et importants qui ne tardèrent pas à se propager dans toutes les usines métallurgiques, de sorte que, au moment où les Ingénieurs voulurent exécuter de grands ouvrages avec des fers laminés, l'industrie se trouva en mesure de leur fournir les éléments dont ils avaient besoin. Aussi, dans ces dernières années a-t-on fait dans les ateliers de MM. Gouin et Cie, à Clichy, des ponts très-considérables pour être établis sur les chemins de fer que nos Ingénieurs ont construits en Russie, en Autriche, en Italie, en Espagne, à l'Ile Bourbon, &c^a.

Les poutres droites en tôle présentent des formes plus variées que les poutres en fonte. Les plus simples sont composées de quatre fers à cornières réunis deux à deux à la partie supérieure et à la partie inférieure de la poutre et reliés entr'eux par une lame de tôle comprise entre les couples de cornières auxquelles elle est reliée par des rivets. Pl. XLI. fig 1 et 2.

Dans d'autres, les cornières sont reliées par des barres de fer plat placées soit en diagonales opposées avec ou sans montants verticaux, fig. 3, soit en diagonales croisées en leur milieu, soit en diagonales simples dirigées en sens opposés à partir de leur milieu avec montants verticaux, fig. 4 et 5.

Lorsque l'on a voulu obtenir plus de force, on a placé en dessus et en dessous des cornières, des bandes de tôle que l'on a fixées par des rivets à ces cornières, fig. 6. Plus tard,

observant que dans les poutres d'une certaine portée, les tôles ne résistaient pas aussi bien lorsqu'elles faisaient une saillie un peu prononcée au delà des cornières que dans leur milieu, on a été conduit pour prévenir cette déformation à accroître leur solidité, en leur donnant une courbure convexe à la partie supérieure et en assurant la conservation de cette courbure par deux feuilles de tôle disposées en forme de V. fig. 7.

Enfin comme cette forme convexe des tables supérieures ne se prêtait pas à l'emploi de plusieurs tôles superposées pour donner de la raideur aux tables supérieure et inférieure, on les a renforcées vers leur lisière longitudinale, par des cornières simples fig. 8, ou plus fortement encore par des feuilles de tôle comprises entre deux cornières. fig. 9. Ces dispositions diverses se combinent ordinairement avec une âme pleine en tôle, renforcée elle-même soit par des feuilles de tôle verticales fixées normalement à cette âme par de doubles cornières, soit dans l'origine par des montants en fonte en forme de fers à rebords.

Le pont Britannia n'aurait pu être exécuté dans aucun de ces systèmes, son énorme portée de 140^m. rendait nécessaire l'adoption de dispositions plus résistantes, et Stephenson a donné à ses poutres la forme d'un long tube rectangulaire de 9^{m}144 de hauteur et 4^{m}50 de largeur, fig. 10 et 11. La paroi supérieure est formée de huit tubes égaux, accolés les uns aux autres, de 0^m.5334 en carré; son plancher inférieur de 6 tubes de 0^m.7112 sur 0^m.5334. — Les parties latérales sont pleines et reliées tant au plafond qu'au plancher par des goussets de 1^{m}22 de hauteur sur 0^m.533 de largeur.

A la traversée des piles dont la maçonnerie surmonte le tube, celui-ci est renforcé par des armatures en fonte qui, à la partie supérieure font saillie sur le tube, de manière que des boulets placés dans une rainure pratiquée dans une pièce de fonte fortement fixée à la maçonnerie supportent et

maintiennent en même temps le plafond du tube.

Ce tube a plus de hauteur sur la pile centrale qu'à ses extrémités; la décroissance se fait suivant une courbe convexe

Le pont d'Asnières, avec sa traversée de 32.m68 est une imitation en petit du pont Britannia.

Les tubes ont 2.m28 entre les tables supérieure et inférieure de 1m de largeur et 0.m689 de largeur entre les feuilles verticales. Cette petitesse des tubes était nécessaire pour que l'on pût les introduire au milieu des charpentes du pont provisoire, sans interrompre la circulation sur les chemins de Rouen et de Versailles, et même avec ces dimensions restreintes, la substitution du pont en tôle, au pont provisoire a exigé le développement de toutes les ressources de l'esprit inventif de l'Ingénieur (M. Eugè Flachat)

Brunel a construit sur le chemin Great Western, à Windsor, des poutres conçues dans un autre ordre d'idées, et suivant un système désigné par les Anglais sous le nom de Bowstring.

La partie inférieure est droite, tandis que la partie supérieure est courbe, de manière que l'ensemble du pont présente l'aspect d'un arc tendu par sa corde. La section verticale est représentée fig. 13, les travées ont 61m sur 7 de flèche

Le même Ingénieur, pour rivaliser avec Stephenson a fait exécuter un autre pont dit de Saltash comprenant, indépendamment de plusieurs petits passages, deux travées de 138.m68 d'ouverture, disposées dans un système différent. Chacune de ces grandes travées est formée fig. 13 et 14. d'un arc tubulaire à section elliptique de 5.m05 sur 3.m62 présentant une flèche de 8.m76 reposant sur des piliers en fonte et sous tendu par un puissant système de chaînes de 30 maillons, formant au dessous du tube deux arcs concaves parallèles de 8.m38 de flèche,

dont les extrémités sont fixées latéralement au tube par deux énormes boulons qui le traversent de part en part près de ses extrémités.

Au dessous des deux polygones formés par les chaînes se trouvent deux poutres horizontales auxquelles se rattachent les pièces de pont supportant la voie.

Le tube, les polygones et les poutres sont solidement reliés par de très-forts montants distants de 12m environ les uns des autres et par des croix de St André disposées entre les tubes et les arcs polygonaux qui les soustendent.

Les montants verticaux sont formés de feuilles de tôle réunies et renforcées par des cornières présentant en coupe un fer à croix de 0m 713 sur 0m 457.

Le tube est supporté à ses extrémités par des piliers en fonte dans lesquels il est engagé.

Les tiges qui réunissent le tube et les polygones qui en détruisent la poussée sont consolidées par des contrevents qui se croisent sur toute leur hauteur, excepté vers le bas où le passage a dû rester libre sur 4m80 environ de hauteur, pour le passage des trains.

Il n'a été pris aucune disposition pour parer à la dilatation, de sorte que le tablier doit s'élever ou s'abaisser en son milieu, suivant que la température hausse ou baisse.

Telles sont les différentes dispositions adoptées pendant les premières années de l'emploi des poutres en tôle dans la construction des grands ponts.

Mais les poutres droites avec une âme verticale en tôle pleine, ont reçu les plus nombreuses applications. C'est dans ce système qu'ont été construits les ponts de la Quarantaine à Lyon, de Macon sur la Saône, de Langon sur la Garonne &c.

Malgré le succès de ces ouvrages, on ne s'en est pas tenu à l'emploi des âmes pleines. Les Ingénieurs allemands

voulant faire disparaître l'inconvénient que présentent les longues poutres dans lesquelles les trains sont encaissés comme dans un coffre, surtout à la traversée des vallées où l'on a les points de vue les plus pittoresques, ont imaginé pour les grands ponts de remplacer la tôle pleine par un treillis, comme cela avait été fait dans les fermes des combles de la gare de Strasbourg et autres. La première application paraît avoir été faite à Offembourg, sur le Kinsig, dans le grand duché de Bade. Le treillis se compose de bandes de fer plates se croisant à 45° d'abord sur les cornières, ensuite dans l'intervalle, fig 16 et 17. Mais quoique l'on ait employé les cornières les plus larges, on ne pouvait placer à chacune des extrémités des bandes que trois rivets au plus, de sorte qu'il arrivait fréquemment que les rivets manquaient et qu'il fallait une surveillance de tous les instants pour prévenir de plus graves avaries.

Éclairés par cette expérience et par quelques autres faites sur des ponts construits dans le même système, les ingénieurs ont interposé entre les cornières qui relient l'âme aux tables horizontales, une bande de tôle plus ou moins large, suivant la hauteur des fermes, et ont fixé les croisillons sur ces tôles par un nombre suffisant de rivets pour que les efforts auxquels ils sont soumis ne puissent pas compromettre leur solidité.

Mais cette disposition quoique meilleure n'est pas encore sans inconvénient : Un des systèmes de barres du treillis travaille à la compression tandis que l'autre travaille à l'extension, les premières ayant peu d'épaisseur cèdent en fléchissant, de sorte que les barres étendues résistent seules à l'effort tranchant, et c'est probablement l'une des causes de la rupture des rivets.

Cette observation si facile à faire et que nous avions déja faite, il y a cinq ou six ans, aurait dû faire

renoncer depuis longtemps à l'emploi des fers plats dans la construction des treillis, au moins pour celui des systèmes de barres qui travaille à la compression; malheureusement la lumière n'est pas encore faite sur ce point; le pont de Kehl fini l'an dernier et le pont en construction à Argenteuil ont des treillis en barres de fer plat.

On pourrait, certainement lorsque l'on a à construire des ponts à portées restreintes, 40 ou 50 mètres, employer avec avantage, dans la construction du treillis des fers à rebords, fig. 18. Pl. XLI

L'avantage des treillis en pièces rigides a été constaté au chemin de fer du midi, d'abord au pont de l'Orbieu, exécuté en 1857 par M.r Ed. Bonnet, sur la ligne de Narbonne à Perpignan, ensuite au pont de Bordeaux sur la ligne de jonction avec le réseau d'Orléans.

Ce dernier, Pl. XLII. fig. 1 est composé de sept travées dont deux se rattachant aux culées ont 57,m360 d'axe en axe et les cinq autres 77m.056, ce qui donne 500 mètres pour la longueur totale du pont entre les faces opposées des culées

Les fermes de tête ont, entre les tables supérieure et inférieure, une hauteur totale de 6,m35.

Elles sont disposées suivant le système représenté sur la fig. 4 de la planche XLI et sur la fig. 1 planche XLII. C'est à dire que les tables de 0m.880 de largeur, formées d'un nombre convenable de tôles de 0m.012 d'épaisseur sont renforcées contre toute déformation, par d'autres feuilles de 0m.85 de hauteur sur 0m.012 d'épaisseur et consolidées par de doubles cornières de 0m.100, le tout relié au moyen de rivets de 0,025 de diamètre, espacés de 0m.105. Sur tous les points où les feuilles de tôle sont interrompues, on place un couvre-joint de 0m.84 dont les angles sont échancrés; 48 rivets traversent un couvre-joint.

Pour relier la table supérieure à la table inférieure on introduit entre les tôles verticales qui renforcent ces tables 1° des montants verticaux, 2° des Croix de St André aboutissant près des montants.

Les montants et les croisillons sont, comme les poutres, composés de deux tables réunies par une âme au moyen de cornières Pl XLII. fig 3. Ils présentent entre les parois extérieures des tables une épaisseur de 560 millimètres égale à l'intervalle réservé entre les tôles qui renforcent les T des poutres principales et présentent en élévation et en coupe les formes indiquées fig 4 et 5. Les tables et croisillons sont reliés aux cornières et aux tôles de renfort des poutres, par des rivets de 22 millimètres espacés de 104mm. 46.

Une difficulté s'est présentée au point de croisement des deux branches des croisillons, l'âme de l'un a été coupée à moitié pour laisser passer la moitié de l'autre qui a été conservée, et on a suppléé à la diminution de résistance résultant de cette suppression par des couvre-joints et par des cornières, fig. 4, comme on a essayé de le représenter fig. 6.

Les poutres de tête, disposées conformément aux indications précédentes peuvent résister aux charges verticales, mais elles éprouveraient des déformations dangereuses dans le sens horizontal, si l'on n'y avait pas pourvu par un double contreventement dont l'un est placé au dessous de la voie, l'autre au dessus des fermes.

Celui inférieur se compose 1° des poutres transversales nécessaires pour porter les voies; 2° de longerons placés sous les rails, 3° de poutrelles également à doubles cornières, se croisant dans l'intervalle des pièces de pont et consolidées au point de croisement par des plaques de tôle. Voir Pl. XLII

Les poutres transversales sont formées de deux tables de 0m. 25 de largeur sur 0m. 012 d'épaisseur, et d'une âme

de 0m.862 de hauteur sur 0m.012 d'épaisseur, reliées par des cornières doubles de 0m.100 de largeur. Elles sont rattachées aux poutres principales au moyen de goussets triangulaires de 1m.07 de hauteur et 0m.562 de saillie et de cornières de 0m.070.

Les longerons sont composés d'une âme de 0m.007 d'épaisseur sur 0m.500 de hauteur, et de quatre cornières de 0m.07. Ils sont fixés aux poutres transversales par des cornières de 0m.07.

Les contrevents disposés sous le tablier se croisent dans l'intervalle de deux poutres transversales entre le milieu de l'une et les abouts de l'autre et sont fixés au moyen de rivets et de goussets placés aux points de croisement des poutres et à leur jonction avec les poutres de tête.

Le contreventement supérieur est disposé d'une manière analogue; seulement les poutrelles normales aux poutres principales éloignées de 3m.584 sont plus faibles que les poutres du plancher et il n'y a qu'un longeron dans le milieu de la portée.

Au droit des piles, les fermes sont renforcées, 1° par la substitution au croisillon qui devra y correspondre de cinq montants verticaux distants de 0m.896 les uns des autres et de deux montants ordinaires. 2° par le renforcement de trois de ces montants, au moyen de cornières extérieures; 3° par l'emploi d'une âme pleine en tôle.

Sur ces mêmes piles, les poutres transversales placées sous la voie, et les entretoises normales du contreventement supérieur, sont deux fois plus rapprochées que dans les autres parties du pont; il en est de même des pièces placées en diagonales.

Dans les ponts de portée moyenne 40 à 60m lorsque l'on n'emploie pas des croisillons formés de l'assemblage de feuilles de tôle et de cornières, mais simplement des fers à rebords, que l'on rapproche davantage et que l'on croise

plusieurs fois sur la hauteur des fermes, on peut former les montants verticaux auxquels les poutres transversales doivent se fixer, au moyen de cornières et de bandes de fer plat formant treillis.

Dans les poutres avec âme en tôle pleine, par exemple au pont de Langon construit sous les inspirations des membres du conseil de la Compagnie du Midi, parmi lesquels se trouvaient MM. Clapeyron et Eugène Flachat, on n'a pas pu adopter pour le contreventement des fermes de tête un système analogue à celui du pont de Bordeaux, la hauteur des fermes étant trop faible pour en permettre l'application. On en a adopté un autre qui convient aux ponts dont les fermes ne sont pas assez élevées pour permettre un contreventement supérieur. Il consiste à réunir les montants verticaux des poutres de tête, par les poutres transversales placées alors presqu'au milieu de la hauteur des fermes, et à consolider ces poutres au moyen de contre-fiches qui, les soulageant par dessous vont butter contre l'âme de ces fermes réunies en outre par des entretoises reposant sur les tables inférieures Pl. XLIII, fig. 1, 2, 3, 4, 5 et 6.

On forme ainsi des triangles qui, par l'invariabilité de leurs côtés sont très-propres à assurer la rigidité de la construction.

Dans la coupe fig. 6, on a projeté l'un sur l'autre les deux systèmes de consolidation et de liaison du plancher et des fermes.

Sur le même chemin, on a exécuté à la traversée du Ciron, près de son embouchure dans la Garonne, un pont en une travée dont les poutres ont été étudiées par Mr. Clapeyron pour les faire travailler comme si elles étaient encastrées Pl. XLIII fig. 7, 8, 9, 7bis et 8bis. Elles sont recourbées à leurs extrémités et fortement consolidées à leur point d'inflexion, elles sont de plus encastrées dans des coulisses ménagées dans

les culées, et on s'oppose à la flexion au moyen de très-forts plateaux en fonte appliqués contre la face des culées et reliés à la nervure postérieure de la poutre par de très-forts boulons; on a ainsi obtenu une notable économie.

2° Ponts en arcs.

La tôle a été employée à construire des arcs à grande portée à peu près en même temps que l'on exécutait des poutres droites.

En France, cependant, il en a été fait peu d'applications. Les plus importantes sont les ponts d'Arcole et de Brest. Le premier fixe, le second mobile; mais sur les canaux et dans les ports de mer, on a construit beaucoup de ponts tournants, et il y a au moins 12 ans, j'avais proposé ce système de construction au pont de Brest.

Deux dispositions ont été adoptées pour les arcs. Dans l'une, chaque ferme est composée de deux arcs continus, à peu près concentriques, formés de feuilles de tôle réunies par des rivets, et d'une âme verticale également en tôle, fortement reliée aux arcs par de doubles cornières; c'est ce système qui a été suivi aux ponts d'Arcole et de Brest.

L'autre disposition consiste à former chaque arc de feuilles de tôle verticales, placées jointivement les unes à la suite des autres, découpées suivant la courbure que doivent affecter les arcs d'intrados et d'extrados, et renforcées suivant l'ouverture des arches et la charge que le pont doit supporter par un ou deux rangs, soit de fers à T, soit de fers à rebords, soit de cornières, soit enfin de rails Barlow.

Pont d'Arcole. — Le pont d'Arcole, construit en 1855, par M. Oudry, n'a qu'une seule travée de 80m d'ouverture et 6m.72 de flèche, sa largeur entre les garde-corps est

de 20 mètres dont 8m pour les deux trottoirs et 12m pour la chaussée Pl. XLIV. Sur ces longerons sont disposées 11 fermes, savoir : 9 sous la chaussée et les bordures des trottoirs et deux à 3m.50 de part et d'autre des fermes placées sous les bordures des trottoirs. La forme de la chaussée repose sur des rails Barlow, disposés jointivement sur les longerons des fermes supportés par des croisillons en fer double T placés dans les tympans et reliés à mi-hauteur par un arc spécial réunissant les points de croisement des croisillons.

Quant aux arcs, ils sont formés d'une âme pleine en tôle de 10 millimètres taillée suivant la courbure indiquée plus haut, renforcée à l'extrados comme à l'intrados par plusieurs feuilles de tôle superposées qui sont reliées entre elles et à l'âme, d'abord au moyen de quatre cornières de 100 millimètres, et ensuite par des fers à T de 200 millimètres disposés normalement à la courbe d'intrados et rivés tant à l'âme qu'aux T supérieur et inférieur de l'arc.

Les feuilles qui forment ces T ont 0m.530 de largeur elles sont doubles à l'intrados et à l'extrados sur les deux parties inférieures des arcs, et triples à l'extrados à 6m de part et d'autre de la clef.

Les arcs n'ont que 0m.38 d'épaisseur à la clef et 1m40 aux naissances dans le sens du rayon. Ils sont reliés entre eux et contreventés :

1°. Par des fers à T ou par des cornières fixées par des rivets au dessus et au dessous des arcs à une distance de 3m70

Ces T de 0m.200 de largeur présentent leur nervure saillante de 0m.100 sur les cylindres d'intrados et d'extrados ; les 1er et 9ème à partir des naissances sont remplacés par deux cornières entre lesquelles se trouvent fixées des feuilles de tôle disposées normalement à l'arc d'intrados et de la hauteur de

l'arc auquel elles sont reliées par des cornières.

2°. Par des contrevents formant des espèces de poutres, et composés de deux feuilles de tôle disposées en croix et solidement reliées par 4 cornières.

Ces contrevents disposés diagonalement sont fixés par des rivets aux arcs dans le milieu de leur hauteur. Ces points d'attache sont distants d'environ 2 mètres, mesurés parallèlement aux arcs. Ces contrevents n'existent que sous les trottoirs entre les fermes distantes de 3m50.

Les tympans sont formés de fers à rebords qui se croisent, et sont croisés eux mêmes à leurs points de croisement par des fers à croix disposés suivant une courbe intermédiaire entre le longeron et l'arc. Ces pièces sont réunies en ces points de convergence par de forts mascarons en fonte, au centre desquels passent des contrevents en fer rond s'étendant d'une tête à l'autre.

Cette disposition ne règne que jusqu'à la douzième division de l'arc à partir des naissances, où les croisillons sont remplacés par une feuille pleine en tôle évidée par des trous ovales.

Le longeron est formé d'un fer à T composé d'une âme renforcée à sa partie supérieure par deux cornières sur lesquels reposent les rails Barlow qui servent de planchers au pont et sur lesquels repose la chaussée.

(1) Des mascarons ou coussinets en fonte reçoivent les abouts des croisillons, tant sur les arcs qu'à la rencontre des longerons et servent à la décoration du pont.

Une déformation assez sensible se remarque au sommet des arcs de tête surtout à l'amont. Elle existait au moment de la réception à laquelle j'ai assisté. Est-elle due à un défaut d'exécution ou à une déformation, je ne saurais le dire, toutefois, elle ne paraît pas s'être accrue depuis

1855

Pont de Cumières. — M. Carro Ingénieur attaché au service de la navigation de la Marne, a fait exécuter sur les dérivations ouvertes pour l'amélioration de cette navigation, plusieurs ponts dont j'avais proposé les croquis au Conseil général des Ponts et Chaussées qui l'avait adopté PL. XLV.

Le type des ponts que l'on exécute actuellement dans ce système éminemment économique, sur la dérivation de Chelles, consiste dans deux arcs en tôle surmontés de longerons. les arcs de forme parabolique d'environ 1/10 de flèche consolidés pour chaque arc par deux fers à T placés en sens inverse l'un au dessus de l'autre et fixés au moyen de rivets sur l'âme en tôle placée extérieurement de manière à présenter une hauteur totale de 0m.25. ou par deux fers à T et deux cornières. les longerons sont composés d'une âme en tôle consolidée par deux cornières.

Les arcs et les longerons sont réunis, dans chaque ferme par des fers à T accouplés deux à deux, disposés en triangles fig. 1, et d'une ferme à l'autre, d'abord par des fers à cornières normaux aux arcs, puis par d'autres disposés suivant les diagonales des rectangles formés entre les fermes et les entretoises normales.

L'assemblage de ces pièces entre elles se fait au moyen de goussets en tôle, comme on le voit sur la planche XLV fig. 4.

Ce pont n'est évidemment applicable que sur les chemins donnant lieu à une circulation peu considérable et où une seule voie est suffisante.

Il entre dans la construction des fermes et des contreventements d'un pont à une voie de 23m.20 d'ouverture, représenté planche XLV, un poids de fer de 8980k, 13m.c.50 de bois de chêne

et 1m.93 de bois d'orme pour plancher.

Pont sur le Canal St Denis. — Postérieurement, M. Mantion a fait exécuter sur le Canal St Denis un pont en arc, formé également de plaques pleines en tôle, renforcées et reliées entre elles par des rails Barlow, appliqués sur les deux faces de manière que les bords de ces rails se touchent dans tout le développement des arcs qui ont 0m.61 de hauteur uniforme dans le sens du rayon. Pl XLVI

L'âme des arcs et celle des longerons ont 0m.035 d'épaisseur au sommet de ces arcs sur les 2/5 du développement de ces arcs et 0m.025 seulement sur la moitié; on passe d'une épaisseur à l'autre par une âme à section trapézoïdale.

Les longerons, formés d'une poutre à double T de 0m.30 de hauteur avec tables de 0,015 d'épaisseur sont rattachés aux arcs par des montants verticaux et par des liens inclinés formés les uns et les autres de deux fers à T adossés entre lesquels on a interposé une feuille de tôle.

Ils sont fixés aux âmes de l'arc et des longerons prolongés à cet effet.

Ce pont présente plusieurs particularités remarquables. Ainsi, indépendamment de l'emploi des rails Barlow, on a fait cesser l'indétermination dans la position du passage de la courbe des pressions aux naissances en terminant les arcs par une portion de cylindre creux en fonte, à axe horizontal, qui vient s'engager sur un rouleau de même diamètre faisant corps avec une plaque en fonte qui repose sur des clavettes interposées entre cette plaque et le plateau destiné à transmettre la poussée des arcs à la maçonnerie de la culée.

Les arcs sont rattachés à leur partie inférieure au sabot qui porte le cylindre creux, par quatre rangs de boulons, ainsi que l'indique la figure.

Les quatre arcs du pont et les tympans qui les surmontent, sont consolidés par deux systèmes de contre-vents rattachés aux arcs, l'un à l'intrados, l'autre à l'extrados, et disposés de manière que trois de ces contrevents convergent vers un même point. Ils sont fixés aux arcs, par l'intermédiaire de plaques en tôle au moyen de cornières; les uns de 0m. 20 de largeur, sont dirigés dans le sens des génératrices du cylindre d'intrados, les autres de 0m. 15, suivant les diagonales des parallélogrammes formés par les arcs et par les premiers contrevents.

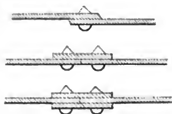
Les longerons sont contreventés comme les arcs, mais par un seul étage de fer à T.

M. Mantion, dans le mémoire qu'il a publié dans les annales des ponts et chaussées pour rendre compte de cet important ouvrage, a indiqué la marche qu'il a suivie pour déterminer les dimensions des différentes parties du pont.

3° Assemblages des tôles entre elles

Les feuilles de tôle ne dépassent pas un poids de 5 à 600 k. et ont par conséquent des dimensions assez restreintes en longueur et en largeur. Les cornières elles-mêmes quoique nécessitant pour la fabrication des paquets moins pesants, ne dépassait guère en longueur 12 à 14 mètres. Lors donc que l'on exécute de longues poutres il faut nécessairement réunir plusieurs feuilles par des assemblages.

On peut ou placer les tôles l'une sur l'autre en les croisant plus ou moins et les reliant au moyen de rivets, ou les disposer à la suite l'une de l'autre en recouvrant le joint par une bande de tôle que l'on relie aux deux feuilles par des rivets, ou enfin recouvrir le joint des deux côtés par deux bandes de tôle qui se correspondent et entre lesquelles les feuilles sont comprimées.



Dans les deux premiers cas, les rivets sont soumis à un effort qui tend à les rompre ou plutôt à un cisaillement d'un seul côté, tandis que dans le dernier les rivets sont comprimés également de part et d'autre de leur milieu et se trouvent soumis à un effet de cisaillement aux deux extrémités.

Les expériences faites en Angleterre dans les ateliers de Mr Fairbarne, à l'occasion de la construction du pont de Menay, et en France, dans les ateliers de Mr Gouin, ont fait connaître :

Que la résistance des rivets est proportionnelle à la section soumise au cisaillement, et que cette résistance par millimètre carré est à peu près les 4/5 de la résistance du même fer soumis à l'extension dans le sens de ses fibres ;

Que si les rivets ne remplissent pas complètement leurs trous, la compression qu'ils exercent sur les tôles est telle qu'elles ne glissent que sous un effort égal à la moitié de celui qui serait nécessaire pour rompre le rivet à l'extension, de sorte qu'en doublant les rivets, on peut, par le frottement seul obtenir une résistance égale à celle que donnerait une feuille continue.

Quant aux rivets eux-mêmes, ils ont généralement

la forme indiquée en marge. Ils se posent à chaud dans des trous percés avec soin et ayant un diamètre de un millimètre de plus que le corps du rivet, de sorte qu'une partie du fer se refoule sur lui-même pour remplir le trou. On peut river à chaud ou à froid le premier mode est employé pour les poutres dont nous nous occupons. La rivure se fait soit à la machine, par un violent effort de compression, soit à coups de marteau.

Epaisseur des Tôles
66
100 parties
33 parties
100 parties

Au pont de Bordeaux on rivait habituellement avec la machine et le travail se faisait vite et bien.

Lorsque les rivets servent à relier des bandes de tôle qui agissent pour résister à la compression, l'intervalle entre ces rivets ne doit pas dépasser 12 à 15 fois l'épaisseur de la tôle, sans quoi celle-ci pourrait se ployer sur elle-même par l'effet de la compression.

Si les rivets résistaient au cisaillement et non pas comme nous l'avons supposé, pour produire un frottement capable de résister à l'effort qui s'exerce pour faire glisser les feuilles de tôle les unes sur les autres, il conviendrait de donner aux rivets un diamètre d suffisant pour que $\frac{\pi d^2}{4}$ fût égal à la section de la feuille de tôle entre les rivets, afin que la tôle et le rivet travaillent également.

Si, par exemple, deux feuilles d'une largeur l et d'une épaisseur e devaient être réunies par des rivets d'un diamètre d, double de e et en nombre n on aurait pour la résistance des rivets

$$n \frac{\pi d^2}{4} R = n \pi e^2 R.$$

La force de la tôle conservée est $e(l - 2ne) R$

les deux quantités doivent être égales et on a en réduisant $n\pi e = l - 2ne$ d'où $n = \frac{l}{(\pi+2)e} = t$; en négligeant dans π la fraction 0,1416, on aura $n = \frac{l}{5e}$; la tôle conservée entre les rivets aura une force égale à celle d'une tôle d'une largeur

$$l - \frac{l}{5e} 2e = \frac{3}{5} l$$

Si l'on avait un assemblage avec deux couvre-joints et d'une file de rivets de chaque côté on aurait :

$$l - 2ne = 2n\pi e, \text{ d'où } n = \frac{l}{(2\pi+2)e} = \frac{l}{8e}$$

et la tôle conserverait une résistance égale à celle d'une tôle dont la largeur serait

$$l - 2ne = l\left(l - \frac{l}{4}\right) = \frac{3}{4} l$$

4° Levage des Ponts métalliques

Les ponts métalliques se préparent toujours dans les ateliers du constructeur, parceque l'assemblage des fers exige l'emploi d'outils puissants mus par la vapeur, et dont le déplacement entraînerait de grandes dépenses. Le pont de Bordeaux, cependant a été exécuté dans des ateliers spéciaux établis aux abords de cet ouvrage, sur la rive droite de la Garonne ; mais cela s'explique par l'importance du travail que nécessitaient des poutres de 500^m de longueur et six piles à fonder à 20^m sous l'étiage. Ainsi les ponts en tôle comme ceux en fonte sont préparés par tronçons plus ou moins considérables, loin de l'emplacement où ces ouvrages doivent être construits.

Ponts en fonte. Les poutres droites en fonte ayant des longueurs restreintes, 10 à 15^m, au maximum, on les met en

place au moyen de chèvres.

Quant aux ponts en arcs, s'ils ont des dimensions peu considérables, 20 à 25m au maximum, on peut, en employant de longs voussoirs de 5 à 6 ou 7m les lever sans échafauds, comme on a fait aux ponts de Bernières et St Germain sur la Seine sur le chemin de Montereau à Troyes.

Après avoir scellé les sabots en fonte destinés à recevoir la retombée des arcs, on a élevé sur les piles et les culées, de petits échafauds en charpente formés au droit de chaque arc d'un poteau maintenu dans une position verticale par des contrefiches assemblées dans un patin formé d'une semelle et de pièces en croix, et solidement retenu en arrière par deux haubans en fil de fer amarrés dans des ancres préparées à cet effet dans les sommets des piles ou à l'extrémité des murs en retour.

Les choses ainsi disposées, on a amené les voussoirs sur un bateau et au moyen de deux chèvres ayant soulevé le voussoir inférieur à la hauteur convenable, on l'a mis en place en le tenant ainsi suspendu. Une fois placé on l'a maintenu en porte à faux au moyen de petits cables en fil de fer fixés aux sommets des poteaux dont on vient de parler. Ce premier voussoir étant ainsi fixé à sa place, on a posé le second comme le premier et on l'a maintenu de même.

Si l'on a fait la même opération sur les deux voussoirs opposés d'un arc, on n'a plus qu'à élever la clef horizontalement et à la mettre en place, pour compléter cet arc dont on prévient la déformation au moyen de haubans.

Un arc étant ainsi posé, on peut monter celui qui lui correspond dans l'arche voisine, et ainsi jusqu'à l'autre culée, de manière que les piles ne soient pas soumises à un effort de déversement qui pourrait altérer leur stabilité.

Avec des arcs composés de plus de cinq voussoirs, ce système ne serait que très-difficilement applicable et il faut recourir à l'emploi des cintres. On peut employer un système analogue aux cintres des ponts en charpente, Pl XXXV, ou pour les très-grands ponts aux cintres fixes analogues à ceux des ponts en maçonnerie mais beaucoup plus légers.

Ponts en tôle. — Les poutres en tôle ont souvent des dimensions très-considérables et alors leur levage présente de grandes difficultés. On suit trois méthodes essentiellement différentes; dans l'une, la plus simple, mais aussi la plus dispendieuse, on établit un pont de service d'une culée à l'autre et on construit les poutres en place.

Dans la seconde, on les monte sur l'une des levées préparées pour accéder au pont et quand elles sont terminées on les met en place en les tirant de la rive opposée avec des engins assez puissants pour vaincre les frottements auxquels donne lieu le déplacement de cette masse reposant sur des rouleaux.

Comme dans cette opération la partie de la poutre qui est avancée au delà du dernier point d'appui pèse à peu près tout entière sur le dernier rouleau, on faciliterait beaucoup l'opération en soulevant la poutre au moyen d'une presse hydraulique agissant sous un chevalet auquel elle serait suspendue par sa partie supérieure, ce qui aurait en outre l'avantage de prévenir le déversement.

La troisième méthode est celle qu'ont employée MM. Stephenson et Brunel pour mettre en place les ponts de Menay et de Saltash. Elle a consisté à amener les poutres sur des bateaux entre les points d'appui dans lesquels on avait ménagé une brèche pour recevoir leurs abouts, à les suspendre à des chaînes verticales partant d'un échafaud élevé au dessus

de l'emplacement que les poutres devaient occuper et à les soulever avec ces chaînes au moyen de puissantes presses hydrauliques agissant sur les points d'attache supérieurs des chaînes.

Les poutres étant arrivées à leur hauteur, on a exécuté la maçonnerie nécessaire pour remplir les sortes de coulisses réservées pour permettre leur ascension.

Arcs en tôle : — Les arcs en tôle ne peuvent se mettre en place qu'au moyen d'échafauds, à moins que la portée ne soit faible et alors on les met au levage d'un seul morceau en les soulevant au moyen de chèvres.

5° Choix entre les divers systèmes de ponts métalliques fixes.

On peut construire les ponts en bois, en maçonnerie en fonte ou en fer. Il y a dans chaque cas un choix à faire entre ces divers modes de construction, excepté quand les ouvertures à franchir sont peu importantes, car alors on ne doit pas hésiter à employer la maçonnerie, si ce n'est quand la pierre manque entièrement.

Mais chaque jour l'emploi du bois perd du terrain parceque l'on sent mieux l'inconvénient qu'entraînent les renouvellements plus ou moins fréquents des ouvrages en charpente. Ainsi on n'a en général à comparer que les ponts en maçonnerie et en métal.

Lorsqu'un pont doit être construit dans une vallée dont le sol résistant permet d'exécuter des fondations solides et à un prix modéré, on ne doit pas balancer à le faire en maçonnerie, et même à employer de petites arches si la nature du cours d'eau à franchir ne fait pas une loi de conserver à l'eau de larges issues.

Si au contraire le sol est mauvais, par conséquent les fondations difficiles et dispendieuses, il faut réduire autant que possible le nombre des points d'appui et on est conduit par là à faire de grandes arches ou de grandes travées.

On a alors à calculer s'il convient de faire soit des arches en maçonnerie, soit des arcs en fonte ou en tôle, en évaluant la dépense à faire dans ces divers cas et donnant la préférence à celui des modes de construction qui donne lieu à la moindre dépense. On doit même choisir les arches en maçonnerie, si elles ne coûtent pas sensiblement plus que les arches en métal.

Mais si les fondations sont difficiles et n'atteignent encore qu'un sol médiocrement résistant, il n'y a pas à balancer, les poutres droites en fers laminés doivent être préférées, parcequ'elles ne donnent pas, comme les voûtes en pierre ou en métal, des poussées horizontales qui ont pour effet inévitable le déversement des maçonneries reposant sur un sol compressible, même à un faible degré.

5e Section

5.e Section

Ponts suspendus

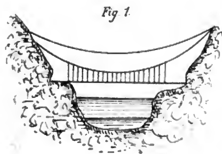
Art. 1.er _ Description des divers systèmes exécutés.

Les ponts suspendus, comme leur nom l'indique, sont ceux dont le tablier est soutenu au moyen de tiges de suspension ou de supports par des chaînes ou des cables attachés par leurs extrémités à des points fixes.

Quoique cet admirable moyen de communication n'ait été inventé que depuis peu d'années, on en a fait d'innombrables applications pour franchir les fleuves et les grandes rivières sur lesquels l'établissement des ponts ordinaires en bois, en pierre ou en métal avait été ajourné faute de ressources suffisantes pour en couvrir les frais.

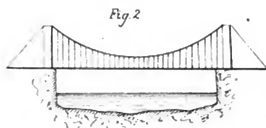
Le mode de suspension et le mode de construction, ne sont pas partout les mêmes.

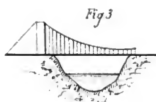
Fig. 1.

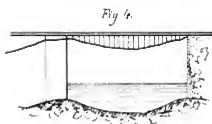


Ainsi, quant au mode de suspension, on a quelquefois fixé les cables aux rochers mêmes entre lesquelles passe le cours d'eau à franchir, fig. 1, plus souvent on a fait passer les chaînes sur des piliers ou supports au delà desquels elles s'infléchissent pour venir s'amarrer au dessous du sol, fig. 2

Dans certaines localités, pour supprimer







ces chaînes infléchies qui barraient les quais, on a diminué ou supprimé les supports de rives fig. 3

Enfin dans quelques cas on a placé les chaînes au dessous du tablier comme dans la fig. 4.

La construction des supports a varié également. Quelques Ingénieurs les ont exécutés en maçonnerie avec des dimensions suffisantes pour résister aux efforts horizontaux qui se produisent dans une construction aussi légère par l'effet des chargements inégaux auxquels le plancher est soumis. D'autres les ont, au contraire exécutés en fonte et ont employé des moyens plus ou moins ingénieux pour prévenir leur déversement.

Dans la construction des chaînes ou cables, on a employé le fer en barres, le fil de fer, quelquefois le chanvre.

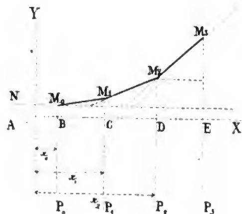
Avant d'entrer dans les détails d'exécution relatifs à ces différentes parties des ponts suspendus nous allons rappeler en peu de mots les formules applicables à ce genre de construction.

Art. 2. Formules applicables aux ponts suspendus.

§ 1. Courbes formées par les chaînes d'un pont suspendu

Soit $NM_0\ M_1\ M_2\ M_3$ . . . . une portion

de la chaîne d'un point suspendu dont le demi côté NM_0 est horizontal. Nous observerons d'abord que toutes les forces appliquées étant verticales, la composante horizontale des différentes tensions doit être constante dans tous les points de la chaîne. Nous observerons de plus que le poids du tablier étant très-grand, par rapport au poids des chaînes, et la chaîne elle même peu inclinée, les poids agissant aux différents sommets sont sensiblement proportionnels au poids des portions correspondantes du tablier et qu'ainsi chacun des sommets du polygone est chargé de poids que l'on détermine en multipliant le poids du mètre linéaire de plancher et de chaîne par la longueur du plancher comprise entre les verticales passant par le milieu des cotés adjacents du polygone.



Cela posé, considérons ce qui se passe dans ce système. Au point M_0 nous avons la tension du côté horizontal que nous nommerons Q qui agissant suivant NM_0 fait équilibre à la tension T_1 du côté M_0M_1 et au poids P_0 appliqué verticalement en M_0. Mais si nous appelons x_0, x_1, x_2, x_3 &c. y_0, y_1, y_2 &c. les abscisses et les ordonnées des différents sommets, et p le poids de 1^{m} linéaire de tablier, nous aurons :

$$P_0 = p\left(x_0 + \frac{x_1 - x_0}{2}\right) = \frac{p}{2}(x_1 + x_0)$$

Puisqu'il y a équilibre dans le système les composantes horizontales et verticales agissant en M_0 doivent se faire équilibre, donc nous aurons d'une part, en égalant les composantes horizontales :

$$Q = \frac{T_1(x_1 - x_0)}{M_0 M_1}$$

et d'autre part en égalant les composantes verticales

$$\frac{p}{2}(x_1 + x_0) = T_1 \frac{(y_1 - y_0)}{M_0 M_1}$$

divisant ces deux équations terme à terme, il viendra :

$$\frac{p}{2Q}(x_1 + x_0) = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}.$$

et en réduisant au même dénominateur

$$\frac{p}{2Q}(x_1^2 - x_0^2) = y_1 - y_0$$

Au sommet suivant M_1 nous devons encore avoir équilibre entre la tension ou composante horizontale Q constante à tous les sommets, la tension T_2 agissant suivant le côté $M_1 M_2$ et les poids appliqués depuis le point N jusqu'au milieu de l'intervalle compris entre les tiges M_1 et M_2, nous aurons donc :

$$Q = \frac{T_2(x_2 - x_1)}{M_1 M_2} \quad \text{et} \quad \frac{p}{2}(x_2 + x_1) = \frac{T_2(y_2 - y_1)}{M_1 M_2}$$

d'où en divisant

$$\frac{p}{2Q}(x_2^2 - x_1^2) = y_2 - y_1$$

nous aurons de même

$$\frac{p}{2Q}(x_3^2 - x_2^2) = y_3 - y_2, \text{etc.}$$

nous avons trouvé

$$\frac{p}{2Q}(x_1^2 - x_0^2) = y_1 - y_0$$

Si nous ajoutons toutes ces équations terme à terme, il viendra :

$$\frac{P}{2Q}\left(x_1^2 - x_0^2\right) = y_1 - y_0$$

et en supprimant l'indice pour avoir un point quelconque

$$y - y_0 = \frac{P}{2Q}\left(x^2 - x_0^2\right) \ldots\ldots\ldots \text{[A]}$$

Ainsi tous les sommets du polygone se trouvent sur une parabole. Si au lieu d'avoir un côté horizontal le polygone avait son sommet sur l'axe des y, cela reviendrait à supposer que le côté NM_0, devient nul et l'équation de la courbe serait.

$$y = \frac{P}{2Q}\, x^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{[B]}$$

Dans la pratique, on connait l'ouverture du pont, et on se donne la flèche, c'est-à-dire l'ordonnée du point de la courbe qui se trouve sur la verticale élevée à l'extrémité du plancher. Si nous appelons d la distance entre les points d'attache des chaînes, f la flèche et que nous substituions dans l'équation [B] nous aurons $f = \frac{Pd^2}{8Q}$ d'où nous tirons :

$$Q = \frac{Pd^2}{8f} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{[C]}$$

et par suite

$$y = \frac{4f}{d^2}\, x^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{[D]}$$

Dans le cas du coté horizontal l'équation de la courbe rapportée à son sommet serait encore $y = \frac{4f}{d^2}x^2$ puisque le paramètre est le même.

On démontre plus rapidement que la courbe passant par les sommets du polygone est une parabole en prenant les moments des forces par rapport au point le plus bas de cette courbe. En effet, si l'on considère la partie

de la chaîne comprise entre le point le plus bas de la courbe pris pour origine des coordonnées, le poids de la chaîne sera px et son moment $\frac{px^2}{2}$, puisque les poids p sont uniformément répartis, le moment de la force Q est Qy et on aura en égalant ces moments $Qy = p\frac{x^2}{2}$. Équation qui doit être satisfaite pour $x = \frac{d}{2}$ et $y = f$ et donne $Qf = \frac{pd^2}{8}$ d'où $Q = \frac{pd^2}{8f}$, lequel substitué dans l'équation de la courbe donne $y = \frac{4f}{d^2}x^2$ pour l'équation de la courbe, comme nous l'avons trouvée plus haut. Elle est indépendante du poids de la chaîne.

§.2 _ Parabole inscrite

Après avoir déterminé la courbe circonscrite au polygone, il nous sera facile de démontrer que ce polygone a la propriété d'être circonscrit à une parabole tangente au milieu de ses côtés.



En effet, si nous nous reportons à la fig. 5, nous voyons qu'en supposant le système en équilibre, cet équilibre continuera à subsister quand au polygone $NM_0M_1M_2M_3$ nous substituerons le polygone NdM_2M_3 et que nous conserverons aux côtés Nd et M_3d, les tensions qu'ils avaient d'abord, les poids suspendus au polygone restant toujours répartis proportionnellement à l'horizontale Nc, laquelle est la projection du polygone jusqu'au milieu b du côté M_2M_3. Mais s'il y a équilibre entre les deux tensions et le poids, la résultante des deux tensions doit être égale et opposée à celle des poids. Or la résultante des deux tensions passe nécessairement par leur point de rencontre d, tandis que celle des

poids passe par le milieu de Nc. Il faut donc que le point d soit au milieu de Nc. Si cette condition est satisfaite, il arrivera, en prolongeant bd jusqu'en c et menant ba parallèle à Nc ; que l'on aura les triangles bdc et Ndc qui seront égaux, qu'ainsi $bc = Na = Nc$, que par conséquent les points milieux des côtés se trouvent sur une parabole à laquelle les côtés du polygone sont tangents, puisque la sous tangente est double de l'abscisse.

§.3. Tension de la Chaîne

Fig 6

A, $\frac{d}{2}$, B, T_x, C, T, D, E

Pour obtenir la tension d'un des côtés du polygone, nous remarquons que la tension T_x du côté M_1M_2 par exemple, fig 6 est à la tension horizontale Q dans le rapport de BD à BA, nous aurons en appelant T la tension du dernier côté du polygone.

$$T = \frac{Q \times \sqrt{\frac{d^2}{4} + 4f^2}}{\frac{d}{2}}$$

et en substituant à Q sa valeur $\frac{pd^2}{8f}$

$$T = \frac{pd}{4f}\sqrt{\frac{d^2}{4} + 4f^2} \; \ldots\ldots\ldots\ldots \; [E]$$

§.4. Longueur du Polygone

(Dans l'étude d'un projet de pont suspendu) on a besoin de connaître la somme de tous les côtés du polygone. On peut l'obtenir soit en calculant successivement les côtés soit en prenant pour la longueur de la chaîne, celle de la parabole circonscrite, ou la moyenne entre

les paraboles (inscrite et circonscrite)

Lorsque l'on emploie le premier moyen, il se présente deux cas : les tiges peuvent être équidistantes et les côtés inégaux ; où les côtés peuvent être égaux et les tiges inégalement espacées.

Dans le premier, on se donne l'écartement des tiges que nous supposerons égal à e et on a pour un côté quelconque.

$$l = \sqrt{e^2 + (y_n - y_{n-1})^2}$$

calculant y_n et y_{n-1} au moyen de l'équation de la courbe on arriverait ainsi à calculer successivement chacun des côtés avec toute la précision désirable. Mais on voit que ce moyen est fort long, on voit également que tous les côtés ont des longueurs différentes et que par conséquent l'exécution exige une grande attention dans la fabrication

Dans le second cas, les côtés du polygone sont égaux et les espacements décroissent à mesure que l'on s'approche des points les plus élevés de la courbe, il faut nécessairement pour déterminer la longueur du côté, procéder par voie de tâtonnement et dans ce cas cela devient encore plus long. Si l'on avait fixé la longueur d'un des côtés et qu'on voulut obtenir les autres, on remarquerait que l'on a

$$l^2 = (x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2 \qquad \boxed{A}$$

que de plus le côté compris entre les points n et $n-1$ et faisant avec l'horizontale un angle dont la tangente est α_n satisfait à l'équation

$$y_n - y_{n-1} = \alpha_n (x_n - x_{n-1}) \ldots\ldots \boxed{B}$$

Mais en un point quelconque de la chaîne la direction de la résultante du poids de la chaîne et de la tension horizontale se confond avec la tangente à la courbe formée par cette chaîne, on a donc :

$$\alpha = \frac{\frac{px}{2}}{Q} = \frac{px}{2Q}$$

substituant cette valeur dans [B] et combinant ces deux équations on trouve :

$$x_n - x_{n-1} = \frac{l}{\sqrt{1+\frac{p^2x^2}{4Q^2}}}$$

expression qu'il est facile de calculer par logarithme attendu qu'en cherchant dans les tables de logarithmes de la tangente $\frac{px}{2Q}$ on trouve immédiatement à côté le logarithme de

$$\frac{1}{\sqrt{1+\frac{p^2x^2}{4Q^2}}}$$

qui est celui du cosinus. En calculant ainsi les abscisses, on verra si on a fait un bon choix.

Ces méthodes comme on le voit, sont fort longues, lors donc que l'on n'a besoin que de la longueur totale approchée de la chaîne, il convient d'employer une méthode plus expéditive qui consiste à prendre la longueur de la parabole pour celle du polygone.

Pour obtenir la longueur de la parabole, nous prenons celle d'un de ses éléments dS dont l'expression est

$$dS = \sqrt{dx^2+dy^2} = dx\sqrt{1+\frac{dy^2}{dx^2}}$$

mais de l'équation $y=\frac{4f}{d^2}\cdot x^2$ on tire en différentiant

$$dy = \frac{8f}{d^2}x\,dx \quad \text{et} \quad \frac{dy}{dx} = \frac{8fx}{d^2}$$

substituant, il viendra :

$$ds = dx\sqrt{1+\frac{64f^2x^2}{d^4}} = dx\left(1+\frac{64f^2x^2}{d^4}\right)^{1/2} = \left(1+\frac{1}{2}\frac{64f^2x^2}{d^4} - \frac{1}{2}\frac{64f^4x^4}{4d^8} + \&c...\right)dx$$

Or on voit que f étant environ 1/3 de d, tandis que x est égal à $\frac{d}{2}$, le troisième terme est tout-à-fait négligeable, par rapport aux deux premiers, ainsi on peut se contenter de prendre

$$ds = dx\left(1+\frac{32f^2x^2}{d^4}\right)$$

d'où en intégrant, on a :

$$s = x + \frac{32}{3}\frac{f^2x^3}{d^4} + c$$

La constante est nulle puisque $s=0$ quand $x=0$, donc à la limite, c'est à dire pour $x=\frac{d}{2}$ nous aurons :

$$s = \frac{d}{2}\left(1+\frac{32}{3}\frac{f^2d^2}{4d^4}\right) = \frac{d}{2}\left(1+\frac{8}{3}\frac{f^2}{d^2}\right).$$

ce qui nous donne pour la parabole entière.

$$s = d\left(1+\frac{8}{3}\frac{f^2}{d^2}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots \text{[F]}$$

§. 5 _ Augmentation de la flèche par l'effet de la dilatation

Si au moyen de la formule [F] nous voulons calculer l'augmentation de la flèche qui résulterait de la dilatation produite par l'accroissement de température ? nous observerons que l'allongement du fer est proportionnel

au nombre de degrés d'augmentation et qu'il est de 0,0000122 par degré. Ainsi en appelant t ce nombre de degrés, Σ l'allongement total de la chaîne S on aura $\Sigma = St \times 0{,}0000122$.

Pour cette chaîne d'une longueur $S+\Sigma$, nous aurons une nouvelle flèche qui sera $f+\delta$, en nommant δ l'accroissement de flèche. Substituant ces quantités dans la formule [F], il viendra :

$$S+\Sigma = d\left(1+\frac{8}{3}\,\frac{f^2+2f\delta+\delta^2}{d^2}\right)$$

et retranchant la valeur de S on aura :

$$\Sigma = d\left(\frac{16f\delta+8\delta^2}{3d^2}\right)$$

mais δ étant très-petit, $8\delta^2$ sera négligeable par rapport au premier terme et on aura définitivement :

$$\Sigma = \frac{16f\delta}{3d} \quad \text{d'où} \quad \delta = \frac{3d\Sigma}{16f}$$

Ainsi, supposons un pont de 100m d'ouverture, de 5m de flèche, la chaîne à 0 de température aura une longueur de 100m.666 ; si la température augmente de 30° la chaîne s'allongera de $100^m666 \times 30 \times 0.0000122 = 0^m.036$, et la flèche s'accroîtra de

$$\delta = \frac{3 \times 100 \times 0.036}{16 \times 5} = \frac{10^m.80}{80} = 0^m.135$$

§.6.

§.6. — Allongement résultant de la tension des chaînes

Lorsque le fer est soumis à une tension, il s'allonge. Cet allongement est proportionnel aux tensions et a été trouvé de 0,00005 de sa longueur, par kilogramme et par millimètre carré de section.

Si donc on a une chaîne ou un câble d'une section ω soumise à une tension totale T ou à une tension par millimètre carré de $\frac{T}{\omega}$, ayant une longueur S, ce câble s'allongera d'une quantité ε représentée par.

$$\varepsilon = \frac{S \times T \times 0,00005}{\omega} = \frac{ST}{20000\,\omega}$$

Si nous appliquons cette formule au pont que nous avons déjà pris pour exemple et dont les chaînes présentent une section de 60000 millimètres carrés, on trouvera :

$$\varepsilon = \frac{180,000 \times 100.66}{20000 \times 60000} = 0^m15$$

Connaissant cet allongement on déterminerait, comme nous l'avons fait plus haut, l'augmentation de la flèche.

On peut déterminer par une seule opération l'augmentation totale de la flèche résultant de l'élévation de la température et de la surcharge.

§.7. — Calcul de la section à donner aux chaînes

Quand on a arrêté la forme d'un pont suspendu, il faut calculer la section à donner aux chaînes

pour qu'elles résistent à la tension qu'elles supportent.

Pour cela, il faut connaître le poids dont les chaînes seront chargées et l'effort auquel le fer peut être soumis sans s'altérer. Quant au poids du tablier, on le calcule facilement puisque l'on connait sa forme, ses dimensions et la densité des matières que l'on y emploie. Pour déterminer le poids des chaînes, il faut d'abord en connaitre la section, ce qui ne peut se faire que lorsqu'on sait la tension à laquelle elles sont soumises.

De nombreuses expériences ont été faites sur la résistance absolue du fer; il en résulte que cette résistance, variable pour les différentes qualités du fer, est moyennement de 60 à 80^{k} par millimètre carré de section pour les fils de fer et de 35 à 50 pour le fer en barre.

On a reconnu de plus que lorsqu'une tige en fer était soumise à une tension comprise entre le tiers et le quart de sa force absolue, elle s'allongeait progressivement très lentement, il est vrai, mais cependant assez pour se rompre lorsque l'effort était suffisamment prolongé. D'après cette observation, l'autorité, dans l'intérêt de la sûreté publique prescrit de ne pas soumettre les fers des ponts suspendus à un effort de plus de 12^{k} pour le fer en barre et de 18^{k} pour le fil de fer.

Appelons π la tension à laquelle les chaînes seront soumises par millimètre carré, afin de ne pas préjuger la nature du fer que l'on emploiera.

Nous avons, pour calculer la tension:

$$T = \frac{p d}{4 f}\sqrt{\frac{d^2}{4} + 4 f^2}$$

Nous connaissons dans p, le poids du tablier et des tiges de suspension, mais nous ne connaissons pas le

celui des chaînes ; supposons cependant que nous avons obtenu la valeur de T que nous cherchons, la section des chaînes sera en millimètres carrés $\frac{T}{\pi}$ et le poids par mètre linéaire $\frac{T}{\pi} \times 0^k007788$. Si P est le poids du tablier par mètre de longueur de plancher on aura donc :

$$p\,d = \left(P + \frac{T}{\pi}\,0{,}007788\right) d$$

et substituant dans la valeur de la tension, on a :

$$T = \frac{d\left(p + \frac{T}{\pi}\,0{,}007788\right)\sqrt{\frac{d^2}{4} + 4f}}{4f}$$

d'où

$$T = \frac{Pd\sqrt{\frac{d^2}{4} + 4f^2}}{4f - \frac{0{,}007788\,d}{\pi}\sqrt{\frac{d^2}{4} + 4f^2}}$$

On pourrait encore déterminer la valeur de T en faisant d'abord abstraction du poids de la chaîne, de manière à obtenir la section approximative de la chaîne, par suite son poids par mètre, ensuite recommencer le calcul en ayant égard à ce poids. On arriverait ainsi à très peu près à la véritable tension et par suite au poids de la chaîne.

§ 8. Calcul de la longueur des tiges de suspension

Pour déterminer la longueur des tiges de suspension on se sert de l'équation de la parabole $y = \frac{4f}{d^2}x^2$ en donnant à x les valeurs successives qui conviennent à chacune des tiges, les valeurs de y correspondantes seront les longueurs des tiges au dessus de la ligne horizontale tangente au sommet

de la parabole

Si l'on donne au plancher une forme bombée parabolique, pour avoir la longueur totale des tiges, il faudra ajouter aux valeurs des y les ordonnées de la parabole du plancher prises à partir de la tangente horizontale qui forme l'axe des x de la parabole des chaînes. Ce calcul, comme on voit, est très facile; mais il arrive quelquefois que l'on a besoin de la somme des longueurs des tiges; on remarque alors que s'il y a une tige au sommet les écartements pourront être représentés par 1l, 2l, 3l &c. et que les ordonnées correspondantes seront:

$$\frac{4fl^2}{d^2} \times 1, \frac{4fl^2}{d^2} \times 2^2, \frac{4fl^2}{d^2} \times 3^2, \&c.$$

Ainsi la somme des longueurs sera:

$$\frac{4fl^2}{d^2}\left(1+2^2+3^2+\ldots\ldots\&c.\right)$$

Mais la somme des carrés des nombres entiers consécutifs est, en nommant n le dernier:

$$\frac{1}{6}\, n\,(n+1)\,(2n+1)$$

donc, la somme cherchée sera:

$$\frac{4fl^2}{6d^2}\; n\;(n+1)\;(2n+1)$$

pour une moitié des tiges d'une des chaînes.

S'il n'y a pas de tige au sommet de la parabole, mais s'il y en a deux équidistantes de part et d'autre en appelant toujours l la distance du sommet à la première tige, les intervalles entre les abscisses seront 1l, 3l, 5l, ... et si nous prenons l'équation de la courbe rap-

rapportée à son sommet, les ordonnées correspondantes deviendront :

$$\frac{4fl^2}{d^2} \times 1, \frac{4fl^2}{d^2} \times 3^2, \frac{4fl^2}{d^2} \times 5^2, \&^a$$

dont la somme est :

$$\frac{4fl^2}{d^2} (1+3^2+5^2+\&^a).$$

mais la somme des carrés des nombres impairs jusqu'à m est $\frac{1}{6} m (m+1) (m+2)$ ainsi la somme des longueurs des tiges sera pour un nombre n de tiges $\frac{4fl^2}{6d^2} (2n-1)(2n+1)$ puisque $n = \frac{m+1}{2}$ .. ou que $m = 2n-1$

§.9. _ Calcul du poids des câbles en fonction de l'ouverture et du rapport de l'ouverture à la flèche.

Quand on a besoin de comparer entre eux plusieurs projets applicables à une même localité, il faut pouvoir calculer rapidement le poids des câbles pour des travées de longueurs différentes dans lesquelles le rapport de l'ouverture à la flèche reste constant. Pour cela, supposons ce rapport $\frac{d}{f} = n$ et substituons dans l'expression de la tension [E] nous aurons :

$$T = \frac{pd}{4f}\sqrt{\frac{d^2}{4}+4f^2} = \frac{pnd}{4}\sqrt{\frac{1}{4}+\frac{4}{n^2}} = \frac{pd}{8}\sqrt{n^2+16}$$

Ainsi la tension est proportionnelle à l'ouverture ; mais la section du câble ou de la chaîne est proportionnelle à la tension, par conséquent le poids p du pont par unité

de longueur se compose de deux termes dont l'un est, comme nous l'avons vu §. 7 $\frac{I}{\Pi} \times 0.007788$, Π étant l'effort que le fer supporte par millimètre carré et l'autre le poids linéaire du tablier.

Ainsi le poids du câble croîtra dans le premier terme proportionnellement au carré de l'ouverture et dans le second proportionnellement à la première puissance de cette ouverture

Art. 3. _ Chaînes, câbles, tiges de suspension.

§. 1er Chaînes

Les premiers ponts suspendus et même encore en ce moment la plupart des ponts suspendus d'Angleterre ont été exécutés en chaînes de fer forgé

En France, on en a exécuté quelques uns seulement avec des chaînes et les autres avec des câbles en fil de fer. Cette différence s'explique facilement. En Angleterre, le fer en barre est de qualité supérieure et à bon marché, par conséquent on n'a aucun motif de renoncer aux chaînes, puisque l'on trouve partout les barres avec lesquelles ces chaînes se fabriquent; en France, au contraire, le fer en barre est généralement de qualité inférieure, tandis que le fil de fer qu'on ne peut fabriquer qu'avec de bon fer offre beaucoup plus de garantie de solidité. D'un autre côté, l'exécution des câbles est plus facile que celle des chaînes, surtout dans les lieux éloignés des grandes villes. Enfin, il n'est arrivé que récemment qu'un câble se soit rompu, tandis qu'en France et en Angleterre, plusieurs ponts en chaînes sont tombés par suite d'accidents arrivés à ces chaînes.

Ces seules considérations ne devraient peut être pas déterminer dans le choix à faire entre les câbles et les chaînes, on devrait avoir égard à la durée des fils ou des barres, mais jusqu'à présent on a pu se flatter que les cables bien préparés dureraient autant que des barres et comme les ponts suspendus sont trop nouveaux pour que l'expérience ait prononcé, on a admis l'égalité de durée.

Il y a peu de choses à dire sur la fabrication des chaînes; on en a fait de deux formes; dans les unes les mailles sont exécutées avec des barres ployées en anneaux.

Dans les autres elles sont formées de barres simples terminées à leurs extrémités par des yeux. Il n'y a aucune observation à faire sur ces dernières, mais sur celles en anneaux, nous devons faire remarquer que si on ne prend aucune précaution dans la pose du goujon qui unit les mailles entr'elles, il arrive de deux choses, l'une: si le goujon a un diamètre faible les branches se rapprochent au milieu et la partie courbe se casse extérieurement; si le goujon au contraire n'appuie pas bien dans le fond de l'arc concave, la maille ouvre intérieurement. On ne peut remédier à ces défauts à peu près inévitables, avec des anneaux simplement forgés et non ajustés, qu'en renforçant le fer près de ses extrémités, et en maintenant l'écartement par des entretoises en fonte.

Fig 1



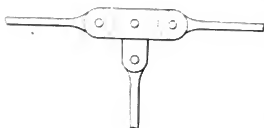
Les chaînons de la forme indiquée fig. 14 sont de beaucoup préférables et sont seuls employés actuellement.

Fig. 2



L'assemblage de ces chaînons entre eux varie avec le nombre des chaînes que l'on doit grouper sur





chacun des côtés du pont, pour résister à la tension. Par exemple si c'est une passerelle d'un faible poids et de peu d'ouverture qui ne nécessite qu'une seule barre de 0m.03 à 0m.04 de grosseur, on relie les maillons au moyen de deux goujons par l'intermédiaire de deux plates bandes percées chacune de deux trous, entre lesquelles on place les maillons, fig. 1

Quand on groupe quatre maillons on peut rapprocher l'un de l'autre les deux maillons dirigés dans un sens en laissant cependant un intervalle entre eux, et placer en dehors de ceux là, (un de chaque côté) ceux qui sont dirigés dans le sens contraire. fig. 2, ou employer quatre bandes groupées comme dans la fig. 3.

Dans le premier et dans le troisième cas les tiges de suspension sont fixées à un boulon qui traverse le milieu des plates bandes fig: 4; dans le second cas la tige de suspension est accrochée entre les deux maillons du milieu (voir la fig 2) comme au pont des Invalides de M. Navier et il faut donner plus de grosseur au goujon.

On pourrait imaginer d'autres combinaisons mais dans tous les cas il faut s'efforcer de rapprocher les uns des autres, les points qui tirent en sens inverse, afin de ne pas donner de la longueur au bras de levier des boulons.

Le travail des chaînes se fait à la forge et exige une grande surveillance sur la qualité du fer et sur le mode de fabrication des maillons, il n'entre pas dans notre

plus de nous occuper de ces détails. Ainsi nous ne revien-drons sur l'emploi des chaînes qu'à l'occasion du mon-tage des ponts suspendus.

§ 2. Câbles en fil de fer.

M. Seguin aîné paraît être le premier qui ait appliqué le fil de fer à la construction des grands ponts sus-pendus. Les câbles qu'il a construits alors et que l'on exécute encore aujourd'hui, ne sont pas à proprement parler des câbles, mais bien des écheveaux, car les fils sont placés parallèlement les uns aux autres et ne sont pas tendus.

D'après cela, il semblerait au premier abord que leur fabrication ne présenterait aucune difficulté. Elle est au contraire rendue fort difficile par la propension des fils lorsque l'on veut les étendre, à reprendre la forme arrondie qu'on leur a donnée en sortant de la tréfilerie, et aussi par la difficulté de tendre également tous les fils d'un même écheveau.

Lorsque l'on a des câbles à fabriquer il faut, au moment où les fils de fer arrivent de la forge, les visiter soigneusement pour faire enlever les parties défectueuses et pour les défendre contre l'oxidation en plongeant, à plu-sieurs reprises pendant un certain temps, dans un bain d'huile de lin bouillante, dans laquelle on a mis 1/100 environ de litharge et un peu de noir de fumée. On les fait sécher à l'abri de la pluie et on les conserve sous des hangards.

Au moment où l'on va fabriquer un cable on enroule sur une sorte de bobine ou de tambour de 0m,40 de diamètre   les fils ainsi vernis et on les attache à la suite les uns des autres en croisant les bouts de 0m.10 et les reliant par des spires jointives faites avec du

fil de fer recuit du N.° 4.

Les fils que l'on emploie pour les cables sont des N.os 17 et 18. Ils ont les diamètres et les sections suivantes :

N.° 17, diamètre 0m.00275 section 5mill.q.es 941

N.° 18, id 0.00308 id 7. 245

On fabrique les cables de deux manières, ou sur un métier disposé ad hoc ou sur place. Le métier à cable est composé, indépendamment d'une série de petits tréteaux ou chevalets disposés comme ceux dont on fait usage dans les corderies, de deux forts poteaux solidement fixés dans le sol à une distance égale à la longueur du cable à fabriquer.

Pour obtenir cette solidité on scelle ces poteaux C fig. 7 Pl. XLIX dans une maçonnerie de plâtre, après les avoir croisés avec deux plateaux horizontaux de 0m.60 à 0m.80 de longueur, placés, l'un vers leur pied, l'autre un peu au dessous du sol B, le premier en dehors, l'autre en dedans du métier, et solidement boulonnés sur les poteaux ; on les contrebutte en outre par un ou deux autres poteaux disposés de même en dedans du métier et reliés aux premiers par une pièce horizontale.

Au sommet de chacun de ces poteaux se trouve placé un fort boulon C a b taraudé sur une longueur de 0.15 ou 0m.20 et recourbé verticalement à l'autre extrémité, de manière à présenter un goujon d'un diamètre suffisant pour résister à l'effort de traction auquel il sera soumis par suite de la tension des fils. Ce boulon est enfoncé dans une sorte de mortaise ouverte pratiquée à cet effet au sommet du poteau contre lequel il est maintenu par un long écrou appuyé sur une forte plaque en fer de 2 centimètres d'épaisseur qui traverse le boulon.

L'appareil a été quelquefois complété par l'addition

à ses extrémités, de deux petites grues d et f, fig 7 et fig. 8 dont on fera plus tard connaître la destination.

Tout étant ainsi disposé, voici comment on exécute en général un câble. On place sur chacun des goujons une croupière en fonte ou en fer forgé disposée comme l'indiquent les fig. 8 et 7 de la planche XLIX, cela fait, on fixe à la pièce A figure 7 l'extrémité d'un fil enroulé sur une bobine placée sur une brouette, un ouvrier muni d'une tenaille à vis (fig. 12) saisit le fil et le tire au delà du goujon de manière à produire une traction d'environ 25 Kil. En même temps qu'il le tire, il tourne autour du poteau en faisant passer le fil dans la gorge de la croupière. Lorsqu'il a ramené le fil parallèlement au métier à câble et qu'il l'a infléchi sur la croupière, il fait avancer la brouette jusqu'au delà de l'autre poteau où il fait la même opération que sur le premier. Lorsque le fil qui a environ 150^{m} est employé, il en attache un autre bout au premier, afin de continuer sans interruption jusqu'à ce que l'écheveau soit terminé. La réunion de deux fils se fait en les croisant de 0^{m}.10 environ et en les serrant avec un fil de fer recuit, N°4 dont les spires se touchent et s'étendent sur 0^{m}.07 environ de longueur.

C'est ainsi qu'ont été fabriqués la plupart des câbles actuels ; mais le mode de tension à la main a des inconvénients graves qui ont été mis en lumière par des expériences que M^{r} Le Blanc, Ingénieur du pont de la Roche Bernard a faites au moment de la construction de cet ouvrage.

Ces expériences lui ont appris que si, à chaque demi-tour d'un fil sur les poupées ou goujons, on le soumet à une traction d'environ 100^{K} de manière à effacer à peu près toutes les cosses ou inflexions avant de le faire

passer sur les goujons il y a plus d'égalité dans le travail de chacun des fils et que la somme des résistances est les 0.86 ou les 0.90 de la somme des résistances de chacun des fils essayés isolément, tandis que cette résistance n'est que les 0.84 de la somme des résistances dans les câbles où les fils n'ont été soumis qu'à une tension préalable de 50k ou les 0m,81 quand cette tension n'est que de 25k. Cette différence tient évidemment à ce que les fils soumis préalablement à une tension se redressent et agissent plus uniformément que lorsqu'ils n'ont pas été tendus.

M. Le Blanc a reconnu de plus, par plusieurs expériences que les câbles autour desquels il y avait le plus de ligatures étaient les plus résistants.

Pour donner une tension égale de 100 Kil. à chaque fil avant de le ployer sur le goujon du métier à câbles, on y suspend, au moyen d'une tenaille à œil, une bombe de 100 K. attachée à une corde passant sur la poulie à pivot placée sur la volée de la grue fixée aux extrémités du métier fig. 7. Puis on fait tourner la grue qui entraîne avec elle la bombe et maintient sa tension jusqu'à ce que le fil soit ployé dans une direction opposée à la première.

Cette tension préalable à laquelle on soumet les fils allonge un peu le travail, mais s'il en résulte 1/20 de résistance dans les câbles, c'est un grand avantage.

Avec ce système de tension, il faut, comme on le voit, que les poteaux extrêmes du métier à câbles soient parfaitement solides, et pour qu'elle se transmette sur toute la longueur de ce métier que les fils n'éprouvent pas de frottement sur les chevalets qui les supportent, c'est ce que l'on obtient en les disposant comme l'indique la fig 13 de la Pl XLIX.

Dans certaines localités, à Fribourg, par exemple, où les

câbles ont 374.m 24 de longueur on a suppléé à l'insuffisance de l'emplacement où l'on pouvait les construire, en plaçant les deux poteaux extrêmes près l'un de l'autre et faisant passer les fils sur un troisième poteau arrondi situé à 187,m 12 du premier.

Lorsque l'on a formé ainsi un câble ou un simple écheveau, avant de s'occuper de son enlèvement de dessus le métier, il faut en resserrer les fils au moyen de ligatures provisoires en fils de fer recuit du N.° 14; d'abord sur les croupières et ensuite de mètre en mètre. Cela fait, avec une forte clef sur laquelle agit un long levier, on desserre la vis sur laquelle l'une des extrémités du câble a été fixée et quand on l'a ainsi rendu libre sur les goujons, on l'enlève sans difficulté, avec le nombre d'ouvriers nécessaires pour le transporter dans le hangar où il doit rester déposé jusques au moment de sa mise en place.

Dans les derniers ponts exécutés en France on a quelquefois fabriqué les câbles sur place. Cette méthode a été employée au pont construit sur le Scorff près de Lorient par MM. Leclerc et Noyon. Voici comment ils ont procédé:

Après avoir exécuté les piles et les galeries d'amarre disposées comme l'indiquent les fig. 6 et 7 de la planche II et par conséquent très-praticables, on a construit une passerelle provisoire CFL établissant une communication facile entre les deux rives. Cette passerelle était composée de deux petits câbles de 60 fils N.° 18, chacun amarrés derrière le passage des portiques au moyen de six fortes pièces de bois appuyées horizontalement sur les piédroits, à ces câbles étaient fixées des tiges de suspension formées de 4 fils seulement et supportant de 2.m 50 en 2,50 des madriers sur lesquels étaient clouées des planches de 0.m 025

De dix en dix mètres, les madriers transversaux étaient

remplacés par des perches saillantes destinées à supporter les fils pendant la fabrication des câbles, et à empêcher ces fils de tomber dans la rivière, de chaque côté de la passerelle étant disposés des garde-corps formés de deux fils rattachés aux tiges de suspension.

Au moyen de cette passerelle présentant une largeur de passage de 1m.50, on a pu faire passer les bobines d'un côté à l'autre de la rivière et par conséquent, former les câbles d'un seul fil continu. Mais au préalable; il a fallu placer entre les deux piliers un fil étalon sur lequel tous les autres fils pussent être réglés. Et ce fil étalon a dû être disposé de manière que les câbles auxquels il aurait servi de régulateur étant chargés du poids du tablier &c. présentât la forme parabolique? Le moyen, le plus simple, pour assurer ce résultat, consiste à charger ce fil, comme doivent l'être ceux qui composeront les câbles, et dans cet état de lui donner la flèche que l'on a arrêtée en faisant le projet; puis d'enlever les poids et de laisser le câble abandonné à lui-même et prendre la courbure qui lui convient.

En général, quand il y a plusieurs travées, on ne donne aux câbles que les dimensions nécessaires pour aller d'un support à un autre. Lorsqu'il n'y a qu'une seule travée, on fait quelquefois des câbles qui s'étendent au delà des supports et se prolongent jusqu'aux points où les câbles de retenue s'enfoncent dans le sol pour y chercher un appui. Les dimensions doivent être calculées avec soin afin de donner au tablier l'inclinaison convenable.

Nous avons ouï dire à un constructeur de ponts suspendus que pour n'avoir pas à s'inquiéter du bombement du tablier, il faisait ses calculs de longueurs de tiges dans l'hypothèse où ce tablier serait horizontal, et qu'ensuite il donnait à sa courbe un développement diminué

de manière à relever le sommet de la parabole du bombement qu'il voulait donner au plancher, pour parer à l'abaissement qui se produit sous la triple influence du poids des câbles et du tablier de la surcharge d'épreuve, et de l'augmentation de la température.

§.3. Tiges de suspension.

Les tiges qui servent à suspendre le tablier se font toujours en fer forgé, lorsqu'elles se rattachent à des chaînes; elles se font en fer forgé et plus souvent en fil de fer quand elles se fixent à des câbles. Dans le premier cas, lorsqu'elles se rattachent à des chaînes, on les y fixe par des boulons disposés comme nous l'avons vu plus haut. Leur grosseur se calcule de manière à pouvoir supporter, outre le poids du tablier, la moitié du poids de la plus lourde voiture qui puisse passer sur le pont; au pont de l'allée d'Antin, où le tablier avait 8m. de largeur, et où les poutres qui soutenaient les tiges étaient espacées de 1m.25 à 1m.50 environ, les tiges avaient 0m.04 de diamètre ou 1600mil.q elles étaient en fer forgé, mais elles étaient destinées au pont des Invalides dont le plancher devait avoir 12m et elles sont un peu trop fortes.

Au pont de Fribourg, les tiges ne sont formées que de 30 fils de fer N°17 présentant ensemble une section de 178mil.q; le tablier a 6m.46 de largeur. Les tiges du pont de Fribourg nous paraissent trop faibles.

Lorsque les tiges sont en fer forgé, elles sont ou carrées ou rondes et d'un seul morceau. Elles portent à leur partie supérieure un œil dans lequel passe un boulon qui sert à les fixer aux chaînes; à leur partie inférieure, elles sont taraudées pour recevoir un écrou qu'on place sous les poutres

quand elles les traversent, et sous une traverse en fer ou en fonte quand elles sont accouplées, leur exécution ne présente aucune difficulté.

Les tiges en fil de fer se fabriquent ordinairement comme les câbles en plaçant des croupières aux deux extré-mités, cependant quelquefois on n'emploie qu'une croupière, mais alors on tourne les fils sur un poteau pour les rame-ner sur la croupière unique. C'est ce que l'on fait quand les tiges de suspension embrassent les poutres comme au pont Louis Philippe. Ces cordes pendantes se suspendent aux câbles de deux manières; soit en les faisant porter sur deux câbles à la fois, soit en les attachant à un seul. Dans le premier cas, la croupière supérieure passe sur une sellette en fonte qui s'appuie sur les deux câbles disposés sur un même cylindre horizontal. (fig. 4. Pl. XLIX)

Dans le second, la croupière est assez ouverte pour que le câble puisse passer dans son intérieur; dans un cas comme dans l'autre, on les fixe avec des ligatures en fil de fer.

Pour suspendre les poutres à ces tiges, on a employé différents moyens, on a enveloppé les poutres d'un étrier por-tant soit un crochet (Pl. XLIX, fig. 3 et 4) qui se fixe dans la croupière inférieure, soit, beaucoup mieux, deux yeux dans lesquels passe un boulon traversant la croupière. Au lieu d'étriers on peut employer un boulon portant mouffle à la partie supérieure; on refendre les poutres en deux pièces entre lesquelles passe la tige dont la croupière s'accroche dans une traverse en fonte placée sous les poutres comme avec les tiges en fer.

Enfin, on a fabriqué les tiges de manière à leur faire embrasser les poutres. Ce dernier moyen est probablement le plus économique et il offre en même temps de la sécurité, mais il n'est pas le plus élégant.

Article 4.

Maçonnerie, système d'amarrage.

§ 1er. _ Culée.

Les ponts suspendus pourraient se construire avec des culées et des piles en charpente, mais par cette disposition on placerait le fer, matière indestructible lorsqu'elle est préservée de l'oxidation sur un appui, qui malgré toutes les précautions n'a qu'une durée de quinze à vingt ans. Aussi ne trouve-t-on qu'un ou deux exemples de ponts suspendus reposant sur des appuis en bois et encore ont-ils été faits pour un service momentané.

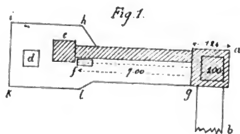
Les culées en maçonnerie que nous considérerons avec les massifs qui s'y rattachent, doivent être disposées pour résister aux efforts de traction qu'exercent les chaînes de retenue et en même temps porter le poids de la totalité ou d'une partie du pont, suivant qu'il y a une ou plusieurs travées.

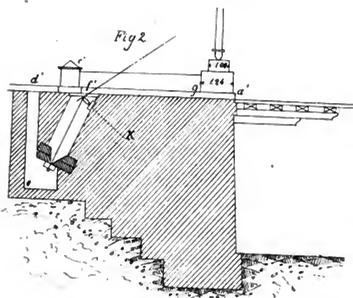
La forme des culées varie avec le mode d'attache des chaînes. Quand il s'agit, comme nous le supposerons d'un pont isolé de toutes parts.

Les chaînes ou câbles de suspension passent, comme nous l'avons vu, sur des piliers élevés sur les culées, puis s'infléchissent au delà de ces piliers pour s'enraciner au dessous du sol. La partie de la chaîne située au delà du pilier porte le nom de chaîne de retenue ; elle fait ordinairement avec la verticale le même angle que la chaîne de suspension,

quelquefois elle est moins inclinée. Arrivée au sol, on la prolonge dans la direction qu'elle a suivie au dessus ou bien on l'infléchit de nouveau.

C'est en général ce dernier parti que l'on prend; on ne prend l'autre parti que quand la chaîne de retenue est moins inclinée que la chaîne de suspension, parcequ'autrement on serait conduit à établir des massifs d'amarrage très-éloignés, qu'on ne pourrait plus relier à la culée, et de cette manière on n'utiliserait pas le mieux possible la maçonnerie.





Dans les ponts suspendus isolés, dont nous nous occupons, on rattache ordinairement aux culées des murs en retour d'équerre, afin de faire servir ces murs à supporter la traction des chaînes et de diminuer le cube du massif d'amarrage. Ainsi soit a b, fig 1 et 2, le parement de la culée. a g la base d'un des piliers, a c, le mur en retour, on dispose un massif a h i k l g dans lequel les chaînes pénètrent en f pour s'infléchir dans la maçonnerie et venir s'amarrer en e dans un puits d'amarre où l'on descend par la cheminée d'e. Par cette disposition le mur en retour a une double destination et il n'y a de maçonnerie spécialement affectée au système

de suspension que le renfort qui entoure le dez c f.

Les dimensions de ce massif doivent se déterminer par ces considérations :

1.° Que l'effort qui tend à le soulever soit moindre que la composante de son poids dans la direction de cet effort, au plus la moitié ;

2.° Que le massif ne puisse pas glisser et pour cela que la composante horizontale de la traction soit moindre à peu près dans la même proportion, que le produit du poids de la maçonnerie par le coefficient du frottement 0.76. Dans ce calcul il ne faut pas faire entrer la cohésion du mortier parce-qu'il se pourrait qu'au moment de l'épreuve cette cohésion fut encore trop faible.

Quand on infléchit le câble, il faut placer l'inflexion sous le sol, parceque lorsqu'elle se fait au dessus, il peut arriver qu'il y ait glissement des assises du dez les unes sur les autres. Il faut de plus que la résultante des deux tensions dirigées comme f K dans le milieu de l'angle formé par les deux directions de la chaine de retenue ne puisse pas renverser la culée. Dans le cas que nous avons considéré, cette résultante tombe ordinairement dans la base de la fondation.

Bien que par l'effet de la tension la maçonnerie soit en partie soulevée par la traction des chaines, il n'en faut pas moins que la fondation soit très-bien faite, parceque sans cela, il pourrait y avoir en cours d'exécution, des tassements qui, en désunissant la maçonnerie nuirait à sa résistance.

Pour se rendre parfaitement compte de l'effet de la traction sur le massif d'amarrage, il convient, comme pour les murs de soutènement, de tracer la courbe des pressions.

Pour qu'il y ait stabilité, il faut qu'elle ne sorte pas de la culée. On tracera cette courbe en décomposant le massif de retenue en tranches et composant successivement la résultante

de la traction des chaînes (comme S K) avec le poids de ces tranches.

Le point capital pour un pont suspendu est que les points d'amarrage soient solidement établis. Nous venons de voir quelles dimensions devaient être données au massif qui soutient l'effort de traction ; il nous reste à dire quelques mots de la forme à donner à la partie des culées où cet amarrage se fait.

Pour l'introduction des câbles dans la culée ou dans le sol, on construisait autrefois des espèces de cheminées dans lesquelles le câble passait pour arriver au puits d'amarrage où il doit être fixé. Les cheminées avaient des dimensions simplement suffisantes pour le passage facile des câbles ; au pont de Fribourg elles avaient 0.15 sur 0.25 pour chacun des câbles de 0m.10 de diamètre. Au pont de Bry sur Marne elles avaient 0m.265 sur 0m.08 pour chaque couple de barres de retenue ; à Triel, sur la Seine, pour deux câbles elles ont 0m.60 sur 0m.25 à l'ouverture supérieure, et 0m.30 sur 0m.10 à la partie inférieure.

Les accidents survenus aux chaînes et câbles d'amarrage ont déterminé l'administration à prescrire, pour le passage des câbles &c. l'exécution des galeries facilement accessibles au moyen desquelles les câbles puissent être visités aussi souvent qu'on le voudrait. Cette mesure a été appliquée aux anciens ponts comme aux nouveaux.

Les puits dans lesquels débouchent les cheminées sont des chambres souterraines dans lesquelles se trouve le système d'amarrage. Au pont de Fribourg ils ont 1m.80 de hauteur et 1m de largeur, à Bry-sur-Marne 1m.50 sur 1m.30 ou 1m.40 ; à Triel 1m.80 de largeur et 1m.55 de hauteur. Le mieux est de se donner un espace suffisant pour exécuter facilement les opérations que l'on peut avoir à faire dans les puits.

Lorsqu'on réunit les deux puits par une galerie, le poids de la terre qui charge cette galerie accroît la résistance du massif de retenue. Pour mieux atteindre ce but dans les ponts exécutés par MM. Séguin, cette galerie est recouverte d'une voûte en arc de cercle dont les massifs d'amarrage sont les culées et ils ferment la galerie latéralement par des pierres presque verticaux.

Au pont de Fribourg, on a profité du rocher pour donner la plus grande solidité possible au massif de retenue (Pl XLVIII fig 1 et 3), malheureusement ces cheminées ne peuvent être visitées et c'est par là que le pont périra.

Quand c'est le massif de la culée qui sert à cet usage, on doit avoir la précaution de placer des pierres de taille de première qualité aux points mêmes où l'amarrage doit se faire. Ces pierres sont indiquées dans la coupe de la culée de Bry sur Marne que nous avons donnée plus haut. C'est sur leur face inférieure que s'applique la plaque en fonte sur laquelle s'exerce directement la pression exercée par les chaînes de retenue.

Des pierres doivent être également placées à l'entrée des cheminées, au point où les câbles s'infléchissent, parceque là il faut un rouleau ou un secteur en fonte pour recevoir la pression.

On doit s'abstenir d'employer dans les puits d'amarrage des pièces de bois, parceque dans une telle position ils sont exposés à une destruction très-prompte, et, aurait-on trouvé le moyen de les conserver, ils n'en seraient pas moins compressibles, et parconséquent impropres à un service où il faut essentiellement des points d'appui fixes.

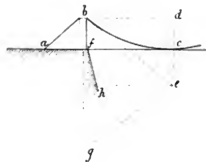
Pour descendre dans les puits d'amarrage, lorsque les deux puits sont en communication, on construit un puits vertical dont l'orifice est fermé au moyen d'une trappe en fonte.

Lorsque l'on construit les câbles sur place, comme au pont St Christophe sur le Scorff, les galeries doivent être disposées de manière que les fils tournent autour de la culée. Cette disposition est indiquée Pl. L fig 1 et Pl. LI fig 6 et 7

Les câbles à tous les points d'inflexion de la galerie doivent être appuyés sur des secteurs en fonte qui les tiennent assez éloignés des murs pour que l'on puisse, après avoir enlevé les ligatures, visiter les fils de l'intérieur des câbles et les vernir de nouveau

§ 2. Piliers.

Nous avons vu que les chaînes et câbles passent sur des piliers placés sur les culées ou sur les piles. La première chose à faire avant d'en arrêter la forme est de chercher la pression qu'exercent les chaînes sur ces piliers, et par suite sur la culée. Pour la culée nous observons que la tension exercée par la chaîne au sommet du pilier bf s'exerce suivant la tangente à la parabole, c'est-à-dire suivant bc et que le point c est placé au dessous de d à une distance double de dc. Nous supposons ba incliné comme bc de sorte que nous avons deux forces agissant suivant ces deux directions et ayant pour expression



$$T = \frac{pd}{4f}\sqrt{\frac{d^2}{4}+4f}$$

dans laquelle T, d et f ont les significations que nous leur avons attribuées dans la formule [E]; la résultante de ces forces sera la pression agissant sur le pilier, et nous verrons en formant le parallélogramme des forces que cette résultante

X est égale à p d. ou au poids du tablier.

Si la chaîne de retenue n'avait pas la même inclinaison que la chaîne de suspension, la composante ne serait plus dirigée verticalement et son intensité serait plus grande que le poids du tablier et de ses surcharges, si l'inclinaison de la chaîne de retenue était moindre que celle de la chaîne de suspension.

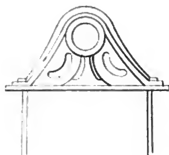
Dans ce cas il faudrait calculer les conditions de stabilité du pilier, comme cela arrive dans les ponts à plusieurs travées dont l'une peut être chargée quand les voisines ne le sont pas.

Dans les ponts exécutés jusqu'à ce jour, on a construit les piliers ou supports des chaînes soit en pierres de taille soit en fonte. En pierre de taille on les a disposés en portique ou en piliers isolés; en fonte on leur a donné la forme de bielles, de portion de cylindre ou de colonnes.

Dans le premier cas, u a quelquefois déterminé leurs dimensions pour qu'en fixant les câbles à leur sommet, ils pussent résister à l'inégalité de tension des câbles dans deux travées consécutives, dont l'une était plus chargée que l'autre.

Pour déterminer cette épaisseur, on calcule d'abord les composantes horizontales des deux tensions dans l'hypothèse où l'une des travées ne porte rien et où l'autre porte la surcharge de 200 kil. par mètre carré de tablier. La différence entre ces deux composantes est la puissance qui tend à renverser, son bras de levier est la hauteur de la pile ajoutée à celle du pilier; la résistance est le poids A du tablier, de la pile et du pilier réunis, et le bras de levier la moitié de l'épaisseur à la base.

Pour que les piles et piliers ainsi disposés puissent résister sans glissement ni rupture, on plaçait



ordinairement quatre tirants en fer dans les piles et portiques. Ces tirants fixés à des ancres s'élevaient jusqu'au sommet des piliers où ils étaient taraudés et servaient à amarrer très-solidement avec des écrous les plaques en fonte portant les chevalets auxquels les chaînes étaient fixées. L'amarrage se faisait au moyen d'un fort goujon ou boulon passant dans les chaînes et dans les ouvertures pratiquées à cet effet dans les flasques des chevalets.

Dans les ponts à une seule travée comme celui de Fribourg, le plus grand des ponts suspendus exécutés jusqu'à ce jour, puisqu'il a 265m.26 entre les points d'appui, cette précaution n'est pas nécessaire, aussi n'a-t-on pas fixé les câbles au sommet des piliers; on les a simplement fait reposer sur les portiques (Pl. XLVIII fig. 1). Ces portiques (fig. 3, 4, 5, 6, 7 et 8) de 20m20 de hauteur et de 5m.80 d'épaisseur, percés d'une arcade, sont construits en pierre de taille reliées entr'elles par des crochets et par des ancres horizontales. Ils sont chargés d'un poids de 460,000K, lequel réparti sur les piédroits qui ont 45m.q.60 de section ne donne par centimètre carré que $\frac{460000}{456000} = 1K$ (*)

Ces portiques n'éprouvent du reste qu'un faible effort horizontal.

Seulement, comme les câbles de retenue, n'ont pas la même inclinaison que les câbles de suspension

(*) Dans les ponts construits avec de la pierre de qualité ordinaire, les voussoirs supportent souvent une charge de 20K.

la résultante n'agit pas perpendiculairement et tend à reporter la pression sur la face des portiques du côté du pont.

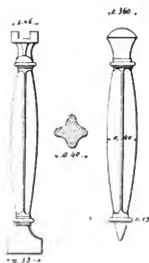
Pour diminuer l'angle de flexion des câbles, on a placé au sommet des piliers trois rouleaux cylindriques en fonte de 0m80 de longueur et 0m60 de diamètre sous chaque couple de câbles Pl. XLVIII-fig. 6 et 7 et Pl. LI. fig. 3.)

Ces rouleaux sont destinés à faciliter le mouvement des câbles sur ces points d'appui, lorsqu'il y a allongement dans le cable de retenue et surtout à répartir la charge sur trois points différents, et cependant on n'en a mis qu'un seul au point d'inflexion dans les cheminées où l'inflexion est plus forte.

Les supports en fonte pour remplacer les piliers ou portiques en fer ont été employés pour la première fois par Mrs Séguin frères. Ils leur ont donné en général la forme des bielles des machines à vapeur, et, dans d'autres cas, aux ponts d'Asnières et de Triel la forme de colonne.

Dans l'un et dans l'autre cas, le support doit se terminer à sa partie inférieure par une espèce de couteau assez allongé pour que la fonte ne s'écrase pas sous la pression. Les câbles du pont de Bry sur Marne sont soutenus sur des supports écartés de 76m et ayant la forme indiquée page 363. Ces supports reposent sur des coussinets en fonte, à la surface desquels se trouve un creux pour recevoir les pieds des supports et empêcher leur glissement. Ils pèsent 730k chacun. cette forme est élégante, mais les étranglements du haut et du bas sont contraires à la solidité aussi bien que la dimension trop faible du couteau sur lequel ils s'appuient.

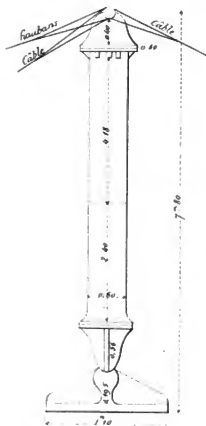
C'est pour ce motif qu'à Triel, ils ont adopté



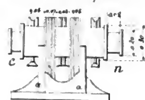
des colonnes creuses de la forme indiquée ci-contre. Elles ont été coulées en quatre morceaux, la base, le chapiteau et le fût en deux parties assemblées à emboitement.

Les câbles au lieu de passer sur ces supports, comme à Bry-sur-Marne où il n'y a qu'une travée, y sont fixés au moyen d'un boulon de 0m.10 de diamètre engagé dans un cylindre en fonte c n de 0m.20. Celui-ci est lui-même pris dans deux entailles demi-cylindriques pratiquées dans les deux faces a a' du chapiteau. Nous verrons plus tard pourquoi il y a du côté de la culée câbles et haubans et du côté opposé deux câbles seulement.

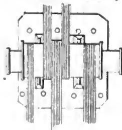
Colonne support du Pont de Triel



Elévation du chapiteau

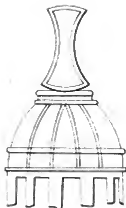


Détail du chapiteau avec l'amarrage des cables et des haubans



Dans ce système de supports oscillants, il importe de donner une grande largeur aux couteaux sur lesquels ils reposent afin d'assurer leur stabilité et de prévenir le renversement qui est quelquefois arrivé par suite des oscillations produites par l'effet du vent sur le tablier, entr'autres à Bry sur Marne; la longueur du couteau doit être à peu près 1/5 de la hauteur

du support.



Au pont de St André de Cubzac dont la fondation nous a déja occupé, les piliers sont formés de tambours à jour superposés et composés chacun de plusieurs morceaux assemblés avec des brides placées dans l'intérieur. La pièce supérieure a la forme d'une calotte sphérique tronquée par un plan horizontal(*) que repose la portion du cylindre oscillant sur lequel passent les cables et les haubans.

Article 5

Plancher, Garde fous

Le plancher, ainsi qu'on le voit Pl XLIX fig 1.2 et 3 et Pl LI fig. 4 et 5, se compose de poutres ou pièces de pont soutenues aux deux bouts par des tiges de suspension. Elles sont écartées comme nous l'avons vu, de 1m 25 à 1m 50 les unes des autres et reliées entre elles au moyen de quatre pièces longitudinales servant en même temps à surhausser les trottoirs

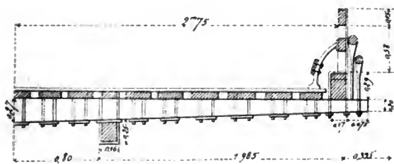
Le mode de suspension du tablier représenté Pl. XLIX est vicieux, comme nous l'avons vu. La liaison des poutres ne l'est pas moins. Aussi arrive-t-il que le passage d'une voiture sur le pont de Fribourg produit des ondulations très-considérables

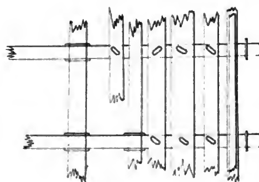
Pour donner de la rigidité au tablier du pont de

(*) C'est sur ce plan horizontal

Triel, voici comment on s'y est pris : Les poutres de 0.m 27 d'épaisseur au milieu et 0m 20 aux extrémités sont espacées de 1m 26 les unes des autres, et ont 0.m 13 de largeur. Elles sont reliées :

1° En dessous par des longrines de 0m. 25 sur 0.16 placées à 0m. 80 de part et d'autre de l'axe, c'est-à-dire sous les roues des voitures. (fig. ci-dessous)

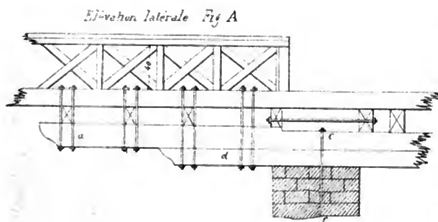




2° en dessus par d'autres longrines placées sous les garde fous à 2m. 76 de l'axe et ayant 0m. 29 sur 0m. 17; l'épaisseur de 0.29 est en deux pièces, l'une de 0m. 25, l'autre de 0m. 04;

3° par les garde corps.

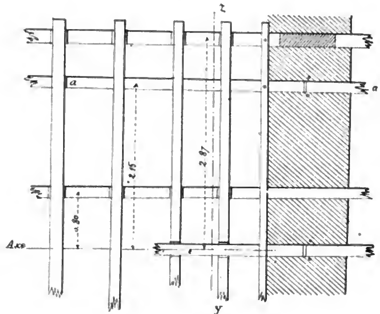
4° par les madriers du plancher inférieur qui, au lieu d'être cloués sur les poutres, sont fixés par des boulons qui traversent les madriers et sont retenus sur ces madriers et sous les poutres par des plate-



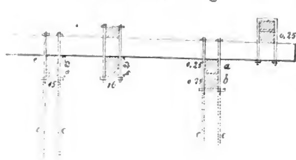
bandes; sur la plate-bande supérieure passe la tête des boulons tandis que l'écrou applique la bande inférieure sous la poutre, comme l'indiquent les figures ci-contre.

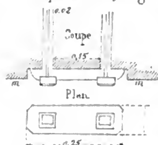
Les plates-bandes ne sont pas toutes disposées dans le même sens, elles se contrarient.

Pour empêcher le tablier de se soulever près des culées ou des piles, quand les travées sont chargées au milieu, les cinq poutres qui en sont le plus rapprochées sont reliées à ces piles ou culées comme l'indique le croquis ci-contre (fig. A et B)



Deux sous-poutres a a' sont placées à 2m,15 de part et d'autre de l'axe du tablier; elles ont 4m.75 de longueur en saillie sur la pile, 0m.25 d'épaisseur et 0m.16 de largeur. Elles reposent sur d'autres pièces d de 0m.25 sur 0m.16 d'équarrissage et 2m.60 de saillie. D'autres corbeaux c de même longueur et grosseur que ces derniers sont placés dans l'axe du pont; toutes ces pièces traversent entièrement la pile et s'étendent d'un seul morceau sous les





tabliers des deux travées ; celles qui se rattachent à la culée s'y engagent de 1m. 50. Pour les maintenir fixement elles sont amarrées à la maçonnerie au moyen de longs boulons c c (Voir les figures A et D) de 3m30 de longueur, posés verticalement dans la maçonnerie à 0m 75 des parements vus. Ces boulons ont leur extrémité inférieure maintenue par une plaque en fonte m m noyée dans la maçonnerie et en dessous de laquelle se trouvent les têtes des boulons.

Du reste, les moises inférieures au tablier, placées sous la voie des voitures, traversent les piles et s'engagent dans les culées comme les sous poutres ou corbeaux dont nous venons de parler.

Ce système de charpente si solide employé pour relier le tablier à la maçonnerie est nécessaire pour prévenir leur disjonction lors du passage des chargements très-lourds et surtout lorsque les grands vents occasionnent dans le tablier des ondulations très-prononcées.

Les tabliers des ponts suspendus sont plus ou moins larges suivant la fréquentation à laquelle ils sont destinés. Cependant on ne leur donne guère au delà de 8m. parcequ'il faudrait employer des poutres énormes pour des largeurs plus considérables. La moindre que l'on ait adoptée pour le passage des voitures est de 4m. 40, sur cette largeur on prend ordinairement 2m. 20 à 2m. 40 pour la voie des voitures et 1m. 10 ou 1m. pour les trottoirs. Les trottoirs sont en général disposés comme dans les figures 1. 2 et 3 Pl. XLIX

Lorsque les ponts ont peu de longueur, le rétrécissement du passage n'a pas de très-graves inconvénients, mais sur les ponts de grande longueur, il faut à la fois passage pour les gens de pied et passage pour deux voitures qui se croisent.

Les deux voitures exigent environ 4m. 80, pour les

trottoirs, on leur donne une largeur proportionnée à la fré-quentation, quelquefois même on les supprime et l'on se borne à placer longitudinalement deux heurtoirs formés de pièces de bois fixées sur les poutres de part et d'autre de l'axe du pont, de manière à garantir les garde-corps et les tiges de suspension du choc des voitures et en même temps à servir de refuge aux piétons dans le cas où deux voitures se croisent.

Si l'on était forcé d'exécuter un pont suspendu dans l'intérieur d'une ville très-populeuse pour livrer passage à de nombreuses voitures et à beaucoup de gens de pied, on placerait les trottoirs entre deux nappes de tiges de suspension et on pourrait, ainsi, sans inconvé-nient, arriver à une largeur de 12^{m} et même plus.

On a récemment fait usage de pièces de pont en tôle, au lieu de pièces de pont en bois. Cette substitution est motivée par le peu de durée des poutres en bois.

Les poutrelles du pont de la Cité à Paris avaient été faites en tôle roulée en cylindres dont on avait prévenu l'écrasement en plaçant dans leur intérieur des diaphragmes en fonte. Maintenant on les ferait en forme de double T.

Les garde-corps, comme nous l'avons dit, servent à augmenter la rigidité du tablier. Pour atteindre ce but, le meilleur moyen est de faire reposer toute la char-pente sur une semelle longitudinale (voir Pl. XLIX fig. 1, 2 et 3 et Pl. LI fig. 5) de construire la lisse en deux pièces dont les joints sont croisés, de placer sur la seconde une plate-bande en fer, afin de relier la semelle et la lisse au moyen de pièces disposées en Croix de St André et de les serrer fortement au moyen de longs boulons dont la place a b est indiquée dans la coupe longitudinale (Pl. XLIX fig. 2 et 3.)

La rigidité des garde-corps serait presque illusoire si on ne les empêchait pas de se déverser ; c'est à quoi l'on parvient en plaçant extérieurement des jambes de force qui sont appuyées sur quelques-unes des poutres prolongées à cet effet, et qui du haut se fixent solidement, soit à la lisse supérieure, soit aux poteaux quand on en emploie. (Voir Pl. XLIX, fig 1 et 3.)

Il y a quelques garde-corps exécutés en fer forgé ; les passerelles de Paris en fournissent des exemples. Cette disposition ne conviendrait pas à un pont fréquenté par des voitures, parceque, pour rendre rigide un tel garde-corps, il faudrait lui donner des dimensions très considérables, ce qui coûterait fort cher et chargerait le pont beaucoup plus qu'un garde-corps en bois.

Article 6.

Application des principes qui précèdent à l'étude d'un projet de pont suspendu.

Nous avons vu à l'article premier quelles étaient les différentes combinaisons adoptées pour la disposition des câbles des ponts suspendus. On peut avoir une seule travée suspendue au moyen de câbles passant sur des supports égaux ou inégaux, ou plusieurs travées égales ou inégales.

A moins de circonstances particulières, on ne fait pas de travée de plus de 100^m, parceque, comme nous l'avons vu, le poids des chaînes ou câbles croît comme le

carré des ouvertures, et que la difficulté d'exécution croissant à peu près dans le même rapport, il y a plus d'avantage à faire plusieurs travées qu'à n'en faire qu'une seule. Les grandes n'ont été adoptées que quand la fondation des supports intermédiaires aurait entraîné à des dépenses très-considérables. Ainsi le pont de Fribourg n'a qu'une travée de 265m26, parceque la vallée de la Sarine sur laquelle il est jeté, a 50m de profondeur.

Ainsi, à la Roche-Bernard où l'on avait à traverser la Vilaine près de son embouchure sur un point fréquenté par des navires à la voile, on a dû également n'adopter qu'une seule travée élevée à 33m au dessus des plus hautes mers.

En Angleterre, il y a des exemples analogues, entre autres le pont de Bangor qui joint l'Ile d'Anglesey à la Grande Bretagne.

On doit dans chaque cas particulier comparer le prix des câbles et des tiges de suspension, suivant les largeurs des travées au prix d'une pile et se décider pour le parti le plus économique, quand toutefois les considérations de navigation ne viennent pas imposer des obligations pour la largeur des travées. Dans cette comparaison le tablier reste le même pour toutes les largeurs de travées, mais néanmoins il faut en avoir arrêté les formes afin d'en connaître le poids sans lequel on ne pourrait pas calculer les dimensions à donner aux câbles.

Quand on est amené ainsi à faire des travées égales, soutenues par des supports égaux, ce que nous avons dit précédemment à l'Art. 2 suffit pour calculer tout ce qui est relatif aux chaînes ou câbles, mais il peut arriver soit que des supports n'aient pas une force suffisante pour résister aux tractions horizontales.

Nous allons examiner successivement ce qu'il convient de faire dans ces différents cas.

Si une chaîne s'étend au delà de la verticale élevée à l'extrémité du tablier, il est évident que toute la partie de la chaîne placée entre cette verticale et le point d'attache n'est sollicitée que par son poids propre, lequel est assez faible relativement à la tension pour être négligé, de sorte que cette portion de chaîne se dirige nécessairement suivant la tangente à la parabole, formée par les maillons des chaînes ou par les lignes qui joignent les points d'attache des tiges de suspension sur les câbles, dès lors on calcule la courbe à partir de ce point de tangence ; on obtient facilement la position de la tangente en remarquant qu'elle vient rencontrer la verticale passant au sommet de la courbe à une distance au dessous de ce sommet égale à la flèche de la courbe prise relativement au point de tangence.

Nous avons vu que l'on pourrait soutenir les chaînes ou cables sur des piliers ou portiques en maçonnerie, soit sur des supports en fonte mobiles sur une espèce de couteau.

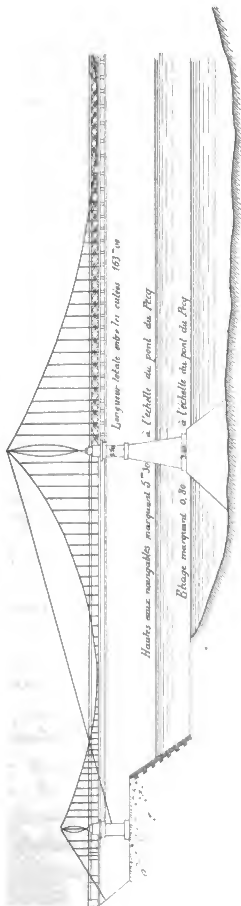
Dans le premier cas, on donne ordinairement aux piliers ou portiques la force nécessaire pour résister aux tractions horizontales ; quelquefois on en réduit l'épaisseur, mais alors il faut quand on n'a qu'une seule travée, placer au sommet un chariot auquel le câble est solidement fixé, afin que ce point d'attache puisse se déplacer suivant les variations de longueur de la chaîne ou des câbles de retenue, quand on a plusieurs travées on amarre les câbles aux piliers, soit en les enveloppant comme au pont Louis Philippe, soit en les ancrant au moyen d'une sellette en fonte amarrée aux piliers par des tirants partant de leurs bases.

Dans l'un et dans l'autre cas, on est conduit à

exécuter des masses considérables de maçonnerie pour soutenir des chaînes ou câbles que l'œil distingue à peine à une petite distance, et il y a là évidemment un contre-sens. Quelques Ingénieurs, frappés de ce défaut d'harmonie entre les parties d'un même édifice ont cherché le moyen d'y remédier. MM. Séguin frères paraissent être les premiers qui aient résolu la question pour les ponts à une seule travée, en exécutant les supports en fonte du pont de Bry sur Marne.

Dans ce cas, la difficulté n'est pas grande, puisqu'il n'y a d'oscillation possible que par l'effet de la dilatation des chaînes ou câbles de retenue, et que ces oscillations ont trop peu d'amplitude pour déverser les supports en fonte.

Mais dans les ponts à plusieurs travées, il n'en est pas de même, et si le sommet des supports n'était pas rendu à peu près fixe, une surcharge placée sur une des travées pourrait amener la ruine d'un pont. Plusieurs Ingénieurs se sont occupés de cette question, entr'autres M. M. Mallet Ingénieur de Vergès et les frères Séguin; ils sont arrivés à proposer l'emploi des haubans. M. Séguin ayant pris un brevet pour un système particulier de haubans, il en est résulté entr'eux et M. de Vergès un procès qui a mis les haubans dans le domaine public. Le système de M. Séguin consiste, ainsi que l'indique l'élévation du pont de Triel (Voir la figure ci contre), à fixer au sommet des supports des haubans qui viennent s'amarrer dans la culée, et qui, dans ce cas particulier, font équilibre à l'excès de traction de la travée du milieu sur les travées latérales. Pour déterminer les dimensions de ces haubans, il faut calculer l'excès de la composante horizontale de la tension dans la



Elévation d'une moitié du pont de Triel

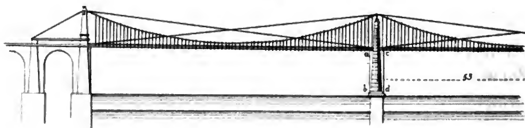
plus grande travée chargée, sur la composante horizontale de la tension dans la petite travée non chargée.

Connaissant cette tension horizontale et l'inclinaison des haubans, on obtient l'effort auquel celui-ci doit résister en divisant la traction par le cosinus de l'angle que le hauban fait avec l'horizon.

Dans un pont composé de plusieurs travées égales, comme le pont de Cubzac, on est obligé de faire croiser deux haubans dans chacune des travées et de placer sur le tablier un câble horizontal auquel les haubans inclinés viennent s'amarrer.

Au point d'amarrage il y a deux cordons verticaux a b c d (Voir la figure P. 374) pour empêcher le soulèvement du câble posé sur le plancher. Ces dispositions sont indiquées ci-dessous.

MM. Séguin



MM. Seguin, au pont d'Ancenis, ont adopté une disposition qui diffère un peu de celle suivie par M. de Vergès; ils ont également des haubans croisés du haut du fléau à la base du fléau voisin, mais au lieu d'attacher les pieds de ces haubans inclinés à un câble horizontal soutenu sur le plancher et sur les piles, ils relient les sommets des fléaux entre eux, par un câble dont la flèche est très-faible.

Dans l'un ou l'autre cas, pour calculer les oscillations possibles des fléaux, il faut se rendre compte de l'influence de l'excès de tension sur le câble horizontal des travées voisines, soit pour diminuer la flèche, soit pour allonger le fil de fer, et avoir égard en outre à l'allongement résultant d'un accroissement possible de température.

Ces trois causes agissent dans le même sens pour allonger le câble horizontal et les allongements sur toutes les travées s'ajoutent à peu près intégralement.

Article 7.

Levage des ponts suspendus

Pendant qu'on exécute les piles et les culées d'un

pont suspendu, on fabrique ordinairement les câbles ou chaînes, les tiges de suspension et la charpente, de manière à pouvoir mettre en place toutes les parties du système de suspension et le tablier dès que l'on a terminé les maçonneries.

Quand les câbles ou chaînes reposent sur des piliers capables de résister à la traction horizontale produite par les câbles non chargés; l'opération est simple, on place au sommet de ces piliers les treuils nécessaires pour soulever les câbles ou les chaînes.

Pour les câbles, on les apporte à dos d'homme depuis le hangar ou le chantier où ils étaient déposés jusque sur les bateaux placés sous la travée à laquelle ils appartiennent. Les chaînes se montent maille à maille sur ces mêmes bateaux réunis par un plancher.

Quand on a ainsi préparé les câbles ou les chaînes, on fixe aux extrémités, d'une manière très-solide des cables en chanvre d'une force suffisante pour résister à la tension que produira leur soulèvement. Quelquefois on les soulage sur plusieurs points de leur portée au moyen de chèvres placées sur les bateaux. Quand cela peut se faire à peu de frais, on ne doit pas négliger cette précaution qui diminue beaucoup la difficulté du levage.

Lorsque les câbles ou chaînes se terminent sur les piliers ou supports, et que ceux ci ne peuvent pas résister à la traction, avant de les abandonner à eux-mêmes on fait équilibre à leur traction en les attachant à des câbles de retenue en chanvre ou en fil de fer du nombre de brins nécessaire pour résister à la tension qui est faible, puis quand tout le système de

suspension d'une des rives est monté, on enfile dans les croupières des câbles ou des chaînes opposées, le goujon qui doit les réunir.

Lorsqu'au contraire les câbles de retenue font suite aux câbles de suspension et doivent franchir un pilier, on les attire au delà au moyen de câbles en chanvre passant sur des treuils convenablement disposés et on les fait passer sur des rouleaux pour diminuer le frottement.

Dans certains ponts suspendus, à celui de Fribourg, par exemple, le système de suspension n'est formé que de quatre câbles disposés par couples de chaque coté du tablier. Ces cables de 0m.13 à 0m.14 de diamètre, n'auraient pas pu être montés en place tout entiers. Leur poids et leur rigidité s'y seraient opposés; on les a décomposés en vingt écheveaux savoir :

12 de 56 fils	....	672
8 de 48 fils	....	384
Nombre de fils		1056

Au lieu de monter les chaînes en place d'un seul coup, comme on fait pour les câbles, on a quelquefois commencé par placer, d'un pilier à l'autre, un câble en chanvre plus élevé que la chaîne; on montait sur un câble un chariot suspendu, attaché au bât de suspension fixé au pilier; des ouvriers placés dans le chariot posaient successivement chacun des maillons de la chaîne, puis les suspendaient au câble, avant de passer au suivant. Ce moyen est simple, peu coûteux, mais il expose la vie des ouvriers, et surtout

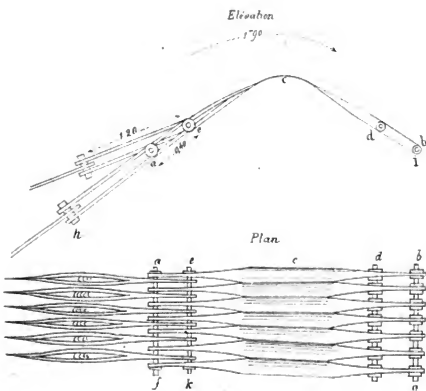
il est long.

Quand au lieu de piliers stables on doit faire passer les câbles sur des supports en fer et en fonte incapables de résister à la traction horizontale, il faut, avant de poser les cables, préparer les moyens de leur faire équilibre avec des câbles en chanvre, ou avec des haubans solides, maintenir les supports dans leur position verticale.

Dans les ponts composés de plusieurs travées, les cables se font en plusieurs pièces et on en rattache les différentes parties entr'elles au dessus des piliers.

Nous avons vu comment on s'y était pris au pont de Triel où les cables et les haubans s'amarrent à un goujon unique.

A Cubzac, où les secteurs cylindriques ne permettaient pas ce mode d'attache, on a placé sur les secteurs des écheveaux abc d'environ 2m 70 de longueur, lesquels enveloppent des chainons en fonte ae, bd, qui servent de croupières à ces écheveaux en a et b. Ces chainons sont percés de deux yeux dans lesquels passent de longs goujons en fer rond af, bg. Au goujon af sont attachés d'autres écheveaux comme ah, pliés en leur milieu, de manière que leurs croupières extrêmes per-



permettent d'y amarrer les cables à l'aide de clavettes insérées entre les croupières opposées. Au goujon est fixé le hauban par une disposition semblable. Les clavettes placées entre les écheveaux et les câbles donnent le moyen de régulariser la tension des câbles et des haubans.

Pour faire pénétrer les câbles dans les cheminées au moyen de treuils extérieurs, on fixe à la croupière qui les termine, une corde en chanvre sur laquelle on exerce un effort de traction soit du fond du puits, soit du dehors, au moyen de poulies de renvoi.

Lorsqu'on emploie des chaînes, les barres de retenue se placent sans difficulté dans les cheminées.

L'amarrage, soit des chaînes, soit des câbles, se fait en plaçant dans l'œil qui termine la chaîne ou dans la croupière du câble, une clavette de la forme indiquée Pl. XLIX, fig. 14 et 15. On règle la flèche du câble au moyen de coins plus ou moins épais que l'on introduit sous la première clavette en forme de lit fig. 7. Ordinairement on fait appuyer le système d'amarrage sur une plaque en fonte; cependant quelques constructeurs trouvent plus simple d'augmenter la forme de la clavette qui presse sur la pierre que d'employer cette plaque; quand on la supprime, il faut avoir soin de calculer la pression que cette pierre aura à supporter et s'arranger pour ne pas dépasser la limite de sa résistance.

Lorsque les câbles changent de direction, soit sur un pilier, soit à l'entrée des cheminées, tous les fils ne se trouvent pas pliés sur le même cercle, et par conséquent ne travaillent plus de la même manière

On atténue l'inconvénient qui en résulte en étendant le cable en nappe au point d'inflexion ou en lui faisant faire une demi révolution sur lui-même dans l'intervalle d'une inflexion à la suivante. Ce n'est qu'après la mise en place de tous les faisceaux d'un câble, quand il est décomposé en faisceaux, que l'on défait les ligatures provisoires et que l'on fait les ligatures définitives en serrant les fils de chaque câble au moyen d'une machine à vis. Ces ligatures se font en fils de fer recuits du N° 14 ou au dessus. Ces ligatures de 0m15 de longueur, sont espacées à peu près tant plein que vide.

Quand les câbles ou les chaines ont été mis en place, on pose successivement les tiges de suspension, en partant de la culée ; on accroche aux premières sur chaque rive la première poutre ; celle-ci placée, on passe à la suivante, en établissant un plancher provisoire sur la poutre posée et sur la culée, puis sur les deux poutres et l'on arrive ainsi à l'extrémité de la travée sans danger ni difficulté.

Nous avons vu comment les tiges de suspension se fixent aux câbles ou aux chaines et aux planchers, nous n'y reviendrons pas.

Une précaution indispensable à prendre pour assurer la conservation des ponts suspendus est de garantir les chaines et surtout les câbles de l'oxidation.

La partie la plus exposée est celle qui passe dans les cheminées ; on parvient à la préserver en peignant avec soin les câbles ou les barres avant leur pose, mais surtout en prévenant la pénétration ou l'écoulement, dans les câbles ou sur les chaines, des eaux extérieures et particulièrement de l'urine.

Les fers exposés à l'air ont également besoin d'être garantis de l'oxidation ; on les en préserve en les recouvrant d'une couche de peinture à l'huile et en renouvelant cette peinture souvent, pour que le fer ne soit jamais à nu, et pour que l'eau ne pénètre jamais dans l'intérieur des câbles. A cet effet, il serait important, quand on place les ligatures dans les points d'introduction des câbles dans les galeries, d'introduire entre les fils, du coltar, qui, en remplissant les vides empêcherait l'eau d'y pénétrer

Ponts mobiles.

Lorsque l'on doit faire passer une voie de communication au dessus d'une rivière ou d'un canal navigable et que les berges ne peuvent pas être élevées à une hauteur suffisante pour que les bateaux ou les navires puissent passer sous le pont, on est forcé de disposer cet ouvrage avec une partie mobile qui puisse être momentanément déplacée pour livrer passage à la navigation fluviale ou maritime.

Les ponts mobiles sont disposés de plusieurs manières. On distingue, indépendamment des ponts de bateaux dont nous ne parlerons pas, trois systèmes principaux de ponts mobiles. Dans les uns, les ponts levis, le tablier mobile se lève pour laisser le passage libre, dans les autres, il roule, de manière qu'en le faisant reculer il démasque également le passage, enfin, dans le dernier système, le tablier tourne sur un point d'appui et vient se placer sur la culée

Nous allons passer en revue ces trois systèmes :

Ponts-levis.

Les ponts-levis ont donné lieu à un très grand nombre de dispositions plus ou moins ingénieuses. Dans les uns, Pl. LII, le tablier ab tournant autour d'un axe a est tenu à peu près en équilibre par une bascule de soutenue, sur un portique AC en bois ou en maçonnerie, au moyen d'une chaîne bd fixée à l'extrémité de la flèche cd ; c'est ce que l'on nomme un pont-levis à flèche.

Dans d'autres le tablier se prolonge au delà de la culée au dessus d'un vide disposé cylindriquement, de manière qu'une partie du tablier AC qu'on nomme la culasse ou bascule puisse en s'enfonçant dans cet encuvement, soulever la volée bc, c'est ce que l'on nomme pont à bascule. La rotation se fait ou autour d'un axe ou sur une courbe calculée pour que la volée et la culasse se fassent équilibre dans toutes les positions. Quelquefois l'équilibre s'établit autour d'un système de contrefiches mobiles disposées pour satisfaire à la même condition. — On aide presque toujours la manœuvre au moyen d'un quart de cercle denté (cde) fixé au tablier et d'un treuil adapté à la culée.

Enfin, dans un dernier système le tablier est soutenu au moyen de deux chaînes inclinées passant sur des poulies placées sur les jambages de la porte, latéralement au pont et chargées de contre-

contrepoids calculés de manière à faire équilibre au pont dans toutes ses positions : les contrepoids viennent successivement se placer les uns sur les autres sur un dez à ce destiné, au fur et à mesure que le tablier se lève et que son bras de levier diminue.

Comme variante à ce système on en a construit beaucoup dans lesquels les chaînes sont remplacées par des barres de fer et les poulies par des roues qui roulent sur une voie dont la courbure est calculée de manière que les contrepoids fixés à l'axe des roues soient en équilibre avec le tablier dans toutes ses positions.

Les ponts levis sont particulièrement applicables à la fermeture des portes d'entrée des villes de guerre où l'on a besoin tout à la fois d'interrompre le passage sur le pont et de clore la ville.

Les ponts levis à flèche présentent le grave inconvénient d'exposer la vie des passants lorsque les chaînes qui relient les flèches au tablier se rompent accidentellement. Il y a eu malheureusement beaucoup d'exemples de ces accidents.

Ponts roulants

Les ponts roulants ont reçu peu d'applications, et cependant leur construction, comme leur manœuvre ne présentent pas de difficulté. Ils consistent en un tablier en bois ou en métal monté sur des galets ou des roues reposant sur des rails horizontaux. Un tablier incliné, adapté à son extrémité, permet de faire

monter les voitures sur le plancher, et ne gêne pas le recul, parcequ'on le soulève, lorsque l'on a besoin d'ouvrir le passage.

Ce système perfectionné comme il pourrait l'être actuellement après tous les progrès récents de la mécanique et de la construction pourrait recevoir d'utiles applications. fig. 1

Ponts tournants.

Dans les ports et sur les canaux et rivières navigables, les ponts tournants sont presque exclusivement employés maintenant.

Ils sont composés d'un tablier construit en bois ou en métal, avec plus ou moins de solidité et porte généralement sur un système de galets habituellement disposés et maintenus circulairement, autour de l'axe de rotation du pont.

Autrefois, pour des ponts de faible ouverture, le tablier portait sur un axe vertical assez solidement fixé dans la maçonnerie, pour maintenir le tablier dans sa position, de sorte que l'axe, d'une très grande force, servait tout à la fois à supporter le pont et à l'empêcher de se déverser soit en avant, soit en arrière, soit latéralement.

Construction des Ponts-Levis

Construction des ponts levis

Les ponts levis sont d'une construction simple et économique et c'est par ce motif qu'on les a presque exclusivement employés à une époque où la considération de dépense était prépondérante. Pour établir un pont levis il suffit d'établir deux petites culées et, quand le passage à franchir est étroit, d'élever sur l'une d'elles un chassis vertical en charpente formé d'une forte semelle sur laquelle sont élevés deux montants verticaux, couronnés par un chapeau, et solidement consolidés d'abord par des goussets dans les angles du chassis et par des contre-fiches en fer scellées du bas dans la maçonnerie et boulonnés du haut sur les montants du chassis. fig. 4.

La culasse des flèches doit être assez lourde pour faire équilibre à la volée, aux chaînes et au tablier et pour que la manœuvre soit possible, il faut 1°. que les axes de rotation des flèches et du tablier et les points d'attache des chaînes forment les angles d'un parallélogramme.

2°. Que la ligne menée de l'axe des flèches au centre de gravité de la bascule, soit parallèle à la ligne menée de l'axe du tablier au centre de gravité des parties du système qui font équilibre à cette bascule.

Si ces conditions n'étaient pas satisfaites, les bras de levier ne conserveraient pas les mêmes rapports avec les poids et l'équilibre qui aurait pu subsister à un moment déterminé se trouverait rompu dans une autre position, de sorte que la manœuvre deviendrait très difficile.

Ordinairement les deux flèches sont réunies, du côté de la bascule, par deux paires de moises que l'on rend solidaires au moyen de deux pièces disposées en croix de S.t André. On a ainsi le moyen d'avancer ou de reculer les moises, de manière à faciliter le réglement de l'état d'équilibre, auquel on ne parvient qu'à l'aide de contre-poids dont la position doit être exactement déterminée par un calcul fait avec soin.

Construction des ponts roulants.

Les ponts roulants, fig. 1 sont faciles à construire, mais il y a toutefois, une observation importante à faire au sujet de leur construction.

Pour qu'ils remplissent convenablement leur destination, il faut qu'ils puissent se reculer d'une longueur égale à l'ouverture de passage qu'ils recouvrent. Cela n'est possible qu'autant que les rails sur lesquels ils reposent s'étendent horizontalement au delà du tablier mobile, d'une longueur égale à la saillie de ce tablier sur la culée. Pour les ponts de faible ouverture, cela ne présente aucune difficulté, mais pour de grands ponts, cette nécessité pourrait devenir une impossibilité, à moins de pratiquer dans la voie publique deux rainures au fond desquelles seraient placés les rails, rainures que l'on recouvrirait de planches à charnières, quand le pont serait fermé.

Construction des ponts tournants

Les ponts tournants sont composés de plusieurs fermes solidement construites et disposées de manière

que les deux parties dont il se compose, la culasse et la volée, se fassent équilibre autour du plan vertical passant par le centre de rotation perpendiculairement au pont. Ce qui est surtout important, c'est que toutes ces fermes soient rendues parfaitement solidaires au dessus de l'axe. Et pour cela on y place une très-forte pièce transversale que l'on désigne sous le nom de chevêtre, fig. 2. C'est sous le milieu de cette pièce que se place le pivot. On y fixe également le cercle en fonte sous lequel roulent les galets, et dont la consolidation exige l'établissement d'autres pièces transversales sur lesquelles le cercle dont on vient de parler puisse être également fixé dans un plan horizontal.

Les ponts tournants se construisent à deux volées, comme les ponts-levis, les ponts roulants et les ponts à bascule; mais pour ces derniers, cette disposition n'entraîne aucun changement dans leur construction. Il suffit de soulenir la volée par des contrefiches, comme l'indique la figure.

Avec les ponts tournants à deux volées, il n'en est pas de même parce qu'il est difficile de leur appliquer des contrefiches quand ils sont horizontaux dans toutes leurs positions, comme cela est nécessaire avec les chariots de galets. En conservant les galets, on ne peut employer des contrefiches qu'en les attachant par des charnières au tablier, de manière à les relever pendant la manœuvre du pont, tandis que pendant le passage sur le tablier, elles sont descendues dans une coulisse circulaire au bas de laquelle elles buttent lorsque la volée tendrait à emporter la culasse. Un treuil sert à les hausser ou à les baisser.

Le plus souvent les ponts à contrefiches sont portés sur un pivot et maintenus dans leur mouvement de rotation par quatre roulettes, deux sous la culasse, les deux autres de part et d'autre du pivot; celles de la culasse ont leurs axes fixes, de manière que quand le pont est fermé elles sont élevées à 0m.15 au dessus de la bande de fonte sur laquelle elles doivent rouler et se trouvent soutenues dans cette position au moyen d'un excentrique à l'aide duquel on soulève la culasse qui est plus lourde que la volée.

Dans ce système on peut disposer la partie inférieure des deux volées de manière qu'elles présentent l'aspect d'un pont en arc et en jouent le rôle parceque leur partie inférieure butte contre la culée préparée à cet effet.

Quelquefois la culasse est soulevée par les deux galets postérieurs qui, à la fin de leur mouvement, montent sur des plans inclinés disposés à cet effet. Mais alors il y a accroissement de résistance au moment où le pont achève la rotation. Au reste, cet accroissement est faible parcequ'il suffit d'un léger mouvement de bascule pour dégager les contrefiches et permettre de les faire tourner de manière à les loger dans des entailles préparées à cet effet dans les culées.

Il a été construit autrefois à Ostende par M. Raffeneau de Lisle un pont tournant dont le pivot était latéral et se trouvait placé près du parement de la culée. Il était soutenu du côté opposé par une roulette et deux autres roulettes soutenaient la culasse. Il existe encore et fonctionne bien.

Il est probable que dorénavant on ne construira

plus que des ponts tournants en tôle et qu'on abandonnera le bois et la fonte. Le bois, parceque il est difficile de se procurer des pièces assez longues pour les poutres et que la partie mécanique entre pour une si forte part dans le travail et par suite dans la dépense, que l'on préfèrera augmenter un peu les frais d'exécution afin de n'avoir pas à recommencer chaque quart de siècle la reconstruction d'une charpente dispendieuse ; on abandonnera la fonte, parceque, travaillant à l'extension on a à craindre les accidents, mais surtout parce que l'on ne peut pas obtenir par la fonte des pièces assez longues.

On a récemment construit à Brest un pont tournant à deux volées de 108^{m} d'ouverture. Il est en tôle.

Fondations à grande profondeur sur les sols très affouillables

Depuis un certain temps on a exécuté, sur des sols vaseux ou mobiles, des fondations solides que l'on n'aurait pas entreprises auparavant.

Fondations tubulaires

Les ponts métalliques formés de poutres horizontales ont donné lieu à de nombreuses applications d'un mode de fondation dont l'idée due à Mr. Triger, Ingénieur Civil n'a été pour la première fois réalisée que vers 1840, pour percer un puits de mine aux environs de Tours.

Malgré les efforts que j'ai faits dès 1842, pour que l'on tirât parti de l'ingénieux appareil imaginé par Mr. Triger, on ne s'en est servi en France qu'après l'avoir vu fonctionner en Angleterre pour la fondation du pont de Rochester.

Il y a été employé à peu près dans son système primitif, pour porter des poutres horizontales, d'abord au pont de la Quarantaine à Lyon, puis aux ponts de Mâcon, de St Germain des fossés &c. ; mais c'est au pont établi sur le Rhin à Kehl pour raccorder le réseau des chemins de fer de l'Allemagne que ce mode de fondation a reçu ses principaux perfectionnements.

MM. Vuigner et Fleur St Denis, chargés de l'exécution de cet ouvrage, qui comportait l'établissement de deux piles culées de 23m.35 sur 7m dans un sol de gravier éminemment affouillable, ont reconnu que les tubes de 3m employés antérieurement ne donneraient pas une solution satisfaisante du problème, et ils ont proposé 1°. de substituer aux tubes en fonte plusieurs caisses rectangulaires en tôle, qui, placées jointivement, formeraient un massif de maçonnerie à peu près complet ; 2° d'élever progressivement sur ces caisses une maçonnerie de béton dont le poids ferait plus que contrebalancer l'effort du soulèvement produit par l'air comprimé ; 3°. d'enlever les déblais à la drague dans des cheminées verticales débouchant à l'air libre.

Quatre caisses de 5m.89 sur 7m.00 ont été placées à la suite les unes des autres, de manière à former un rectangle de 7m.00 sur 23m.56.

Ces perfectionnements ont eu le succès que s'en promettaient les inventeurs, et les quatre

piles du pont de Kehl ont été fondées sans aucun accident fâcheux. Il ne s'est produit dans le cours des travaux que deux incidents seulement qui méritent d'être signalés. Le premier a été la déformation de quelques parois planes à laquelle on a pu remédier par des moyens de consolidation d'une exécution assez facile.

Le second aurait pu être plus grave, il a consisté en une rentrée d'eau accidentelle dans l'une des caisses où le béton que l'on venait de couler avait empêché la sortie normale de l'air refoulé par la pompe. Ce béton ayant été rompu tout à coup et chassé au dehors par l'excès de pression, l'air s'est échappé à la suite, et par l'effet de son élasticité l'échappement a été bien au delà de la limite de pression due à la hauteur de l'eau extérieure. Mais comme les divers compartiments servant à la fondation de la pile étaient en communication, l'air échappé de l'un d'eux a été remplacé plus vite par celui des compartiments voisins que par l'eau extérieure dont la vitesse est à peu près trente fois moindre que celle de l'air sous une même charge; de sorte que les ouvriers, quoique atteints par l'eau, n'ont pas été submergés.

Le système employé au pont de Kehl donne donc aux Ingénieurs un moyen pratique inutilement cherché jusqu'alors pour établir sous l'eau jusqu'à 20 ou 25ᵐ de profondeur des fondations très-étendues et assez profondes pour être inaffouillables même dans les cours d'eau à fond très-mobile. Aussi en a-t-on fait de nouvelles applications au pont de la Voulte sur le Rhône et ailleurs.

Parmi les perfectionnements introduits par MM. Wuigner et St Denis, il y en a deux qui ne sont pas applicables dans tous les cas. Ainsi, on n'a pas besoin pour les ponts métalliques à travées peu étendues, d'établir sur des sols incompressibles des fondations à large base; ainsi encore, on ne peut employer la machine à draguer lorsque le sol renferme des roches. Dans ces cas qui sont assez fréquents, il convient donc encore de faire usage des tubes cylindriques en fonte, mais en y appliquant l'idée ingénieuse réalisée au pont de Kehl, de charger les tubes avec de la maçonnerie, au lieu d'y employer des rails que dans le système primitif on était incessamment obligé de remanier.

C'est ce que l'on a fait avec succès pour la fondation du pont d'Argenteuil, destiné à faire passer sur la Seine le chemin de fer qui reliera la gare de St Lazare au chemin de fer du Nord, à Ermont.

Chacune des piles du pont d'Argenteuil est formée de deux tubes en fonte enfoncés à 15 et 20.m environ au dessous de l'étiage de la Seine et reliés entr'eux par deux étages de contrevents. Pl. XLVII, fig. 1.

Ces tubes ont, depuis leur base jusques au niveau de l'étiage un diamètre intérieur de 3.m70. Au dessus de ce niveau leur diamètre se réduit par un tronc de cône à 3.m20, et ils conservent cette grosseur jusqu'à leur sommet.

Pour enfoncer ces tubes, voici comment on procède: Le premier tronçon du tube est terminé du bas par un biseau dont l'arête tranchante correspond à la paroi extérieure, du haut par une bride intérieure reliée par 40 consoles au corps du tuyau et portant

sur sa face supérieure, un ressort fig 3, destiné à recevoir un boudin en caoutchouc, qui, en s'écrasant entre cette bride et celle du tronçon superposé forme un joint hermétique.

En faisant le joint de ces deux brides on place au dessous de celle du second tronçon un tronc de cône à claire voie formé de 20 nervures en fonte reliées à leur partie supérieure et à leur partie inférieure par les brides horizontales qui servent à les fixer du bas sur les brides superposées des deux tronçons cylindriques inférieurs. Sur ce premier tronc de cône à claire-voie, on en place un second qui a moitié moins de nervures et qui est relié au premier auquel il fait suite.

Pour manœuvrer toutes ces pièces, on a battu au pourtour de l'emplacement de la pile à construire des pieux disposés comme l'indiquent les fig. 3 et 2 et s'élevant, après leur battage, à un niveau supérieur au sommet des piles. Ces pieux a b c, a'b'c' &c. font partie des pieux de l'échafaud nécessaire pour la construction. Ils sont réunis: 1° par deux cours de moises placés, l'un au dessous du niveau ordinaire de la Seine, les autres au dessus du niveau de la pile, 2°, par des goussets s'appuyant sur les têtes des pieux b et c, b'c' &c.; 3°. par des moises triples s'appuyant sur les goussets b.c et sur des pièces comme d.e de même épaisseur que les goussets. Sur ces moises sont placés 8 disques en fonte f percés de trous en leur milieu pour le passage de 8 fortes vis, dont les tiges terminées du bas par un œil, servent à soutenir les tronçons de tuyaux descendus au moyen de chaînes g h, fig. 3 et 7 et des forts écrous adaptés aux vis et repo-

reposant sur les disques. fig. 3.

Des planchers de service sont établis sur les deux étages de l'échafaud.

Une grue roulante planche XXXI est disposée au dessus des vides réservés dans l'échafaud pour soulever les tronçons des tubes et les mettre en place, comme pour enlever et replacer la chambre à air, dont il va être question, lorsque l'on est obligé de la retirer pour superposer de nouveaux tronçons du tube sur ceux que l'on a enfoncés.

Les choses étant ainsi disposées, on soulève le tambour inférieur de l'un des tubes au moyen de la grue; on l'amène au dessus de l'emplacement qu'il doit occuper et on le descend sur des chantiers soutenus par le plancher inférieur; sur ce premier on en descend un second et on fait le joint comme on l'a dit précédemment. Sur les brides de ce joint on a adapté 20 barreaux en fonte présentant les sections indiquées fig. 9 et fig 10 et terminés du bas par une fourchette à deux branches destinée à embrasser les nervures des brides inférieures du second tambour. La moitié de ces barreaux s'élève jusqu'à la hauteur du troisième tambour, les autres jusqu'à la hauteur du second; ils forment des génératrices d'un tronc de cône dont la base serait le cylindre intérieur de la bride du second tambour et la base supérieure n'aurait que 2.m00 de diamètre. L'autre moitié des barreaux s'arrête à la hauteur du second tambour où ils sont fixés à un cercle en fonte placé extérieurement au tronc de cône, et servant également à relier les barreaux de longueur. Ceux-ci s'arrêtent et se fixent à la bride d'un tronc de cône de 0.m80 de hauteur dont la base supérieure ne présente plus qu'un diamètre inté-

de $1^m.40$.

L'intervalle compris entre les barreaux d'un tronc de cône à claire voie et la paroi du tube est rempli d'une maçonnerie de moëllons posés en ciment romain.

Pendant que l'on fait ces dispositions intérieures, on suspend le tambour inférieur aux huit vis dont il a été question, au moyen d'armatures solides fig. 8 boulonnées sur ce tambour et auquel s'attachent les maillons successifs des chaînes (— fig. 3 et 8) qui se terminent aux vis de suspension.

Lorsque les tubes ainsi superposés ont atteint une hauteur telle qu'ils peuvent surmonter le niveau de l'eau lorsque la colonne reposera sur le fond de la rivière, on la descend jusqu'à ce qu'elle arrive à ce point, en manœuvrant d'un mouvement uniforme la vis de suspension. Comme la longueur des vis n'est que de $1^m.50$ environ, on est obligé, quand on a descendu les tubes de la longueur du pas de tenir la colonne suspendue par quatre chaînes pour rallonger les quatre autres et toujours ainsi jusqu'à la descente complète.

Quand la colonne porte sur le sol, on adapte à la partie supérieure des tubes la chambre à air, par laquelle on passe de l'air libre à l'air comprimé dans la colonne.

Cette chambre construite en forte tôle est cylindrique comme les tubes et a $3^m.14$ de diamètre sur $2^m.00$ de hauteur, excepté en son milieu, où un cylindre intérieur d'un diamètre de $1^m.40$ l'exhausse de $0^m.30$.

Les deux cylindres concentriques s'assemblent sur un fond annulaire, de manière que le petit communique librement avec l'intérieur de la colonne.

L'espace annulaire entre les deux cylindres est divisé en deux compartiments égaux par deux cloisons Kl, K'l', fig. 6. Il est consolidé par des fers à T appliqués tant sur le fond annulaire que sur ses parois tant intérieures qu'extérieures.

Sur ses parois extérieures sont rivées quatre sortes de poignées m n reliées au dôme central par des ligatures en fer rond. n p. Ces poignées sont destinées à soulever la chambre à air à l'aide de la grue. Les deux compartiments annulaires sont mis, à volonté en communication par des portes, soit avec l'intérieur de la colonne, soit avec l'extérieur et servent ainsi d'antichambre pour faire entrer dans l'appareil ou en faire sortir les hommes, les matériaux ou les déblais.

Sur la plaque de recouvrement de l'espace annulaire est adaptée une petite machine à vapeur à cylindre oscillant, de la force d'environ 2 hommes, qui met en mouvement un arbre horizontal pénétrant dans la cheminée centrale par une boîte à étoupes. Sur cet arbre est monté dans la cheminée l'arbre d'un petit treuil au moyen duquel on fait monter ou descendre très rapidement les seaux au moyen desquels on retire les déblais et on descend les matériaux.

Le cylindre central est mis en communication avec la pompe à air placée dans un bateau voisin au moyen d'un tube flexible. Ce cylindre central peut lui-même être mis en communication avec l'une ou l'autre des chambres à air par des robinets et ces chambres elles-mêmes communiquent avec l'air extérieur par d'autres robinets.

L'appareil étant ainsi disposé pour la mise

en place des deux tubes d'une pile, il est facile de comprendre la marche du travail de foncement de ces tubes.

En injectant de l'air dans celui des deux tubes où l'on veut travailler, on refoule l'air qui s'y trouve et les ouvriers peuvent descendre sur le fond de la rivière pour la creuser. Les déblais sont déposés dans des seaux d'une capacité d'environ 10 à 12 litres et enlevés par le petit treuil pour être successivement déposés dans celle des chambres à air qui est en service; un seau vide est descendu pour remplacer le seau plein. Quand on a ainsi rempli la chambre de seaux pleins, on la met en communication avec l'extérieur et on vide les seaux pleins que l'on y replace ensuite. Pendant ce temps la seconde chambre fonctionne.

Lorsque l'on a ainsi abaissé le sol d'environ 0m30 au dessous du tube, que l'on a élevé la maçonnerie dans l'espace annulaire en laissant seulement au centre du tube un cylindre vide de 1m40 de diamètre, on manoeuvre les vis auxquelles le tube est suspendu et on le laisse descendre horizontalement jusqu'à ce qu'il s'arrête, s'il est repoussé d'un côté, on l'empêche de céder au moyen d'étrésillons appuyés sur les pieux et les moises de l'échafaud.

On continue ainsi le foncement du tube en montant l'anneau en maçonnerie jusqu'à ce que la chambre à air soit descendue au niveau du plancher inférieur. Lorsque l'on est parvenu à ce point on opère sur le second tube, après l'avoir coiffé de la chambre à air et l'on élève de nouveaux tronçons sur le premier tube de manière que l'on n'a pas d'interruption dans le travail.

Lorsque les poids réunis de la chambre à air, du tube et de la maçonnerie qu'il contient ne suffisent pas pour vaincre le frottement du tube contre le sol environ-

-tournant et la sous pression de l'air comprimé, on est obligé, pour déterminer l'enfoncement, de diminuer la pression dans le cylindre, et à la rigueur, de la supprimer tout à fait.

Le travail dans les tubes est fait par des ouvriers qui y restent quatre heures et se reposent huit heures pour recommencer ensuite. Il faut donc trois équipes. Au pont d'Argenteuil, le travail normal consiste à enlever 1^{mc}80 de déblai pendant les quatre heures, quelquefois ils en enlèvent moins, mais aussi il leur est arrivé d'en enlever 5; alors les 3^{m}20 de supplément leurs sont payés 5^{f} le mètre cube. Le salaire compté par heure est de 0^{f}60, soit de 4^{f}80 pour les huit heures de travail ordinaire.

Nota. On trouvera les détails les plus circonstanciés sur l'exécution des piles du pont de Kehl dans l'ouvrage publié par MM. Vuigner et Fleur St Denis sur la construction de ce pont.

Imp. de l'École Centrale J. Dery & Cie

TABLE DES MATIÈRES

Pages

PARIS. — IMPRIMERIE DE L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES.
18, rue de la Perle.



